

PUB-NO: DE019814697C1

DOCUMENT-IDENTIFIER: DE 19814697 C1

TITLE: Piezoelectric actuator, especially multilayer ceramic
piezo-actuator used as positioning device, ultrasonic
emitter, valve controller or sensor

PUBN-DATE: October 21, 1999

INVENTOR-INFORMATION:

NAME COUNTRY
LUPASCO, DORU CONSTANTIN DE

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME COUNTRY
LUPASCO DORU CONSTANTIN DE

APPL-NO: DE19814697

APPL-DATE: April 1, 1998

PRIORITY-DATA: DE19814697A (April 1, 1998)

INT-CL (IPC): H01L041/083, H01L041/09 , H01L041/16 , H01L041/22 , H02N002/00

EUR-CL (EPC): H01L041/083 ; H01L041/24

ABSTRACT:

CHG DATE=20000202 STATUS=O>The piezoelectric actuator has a helically wound layer sequence (1), in which piezoelectric layer extension occurs roughly parallel to the linear helix winding axis. The piezoelectric actuator has a layer sequence (1) comprising a piezoelectric layer, sandwiched between two electrode layers (6, 7), and a further layer, the layer sequence being wound as a helix about a linear axis such that, on applying a voltage between the electrode layers, extension of the piezoelectric layer occurs in a helix region roughly parallel to the linear axis. Independent claims are also included for the following: (i) production of the above piezoelectric actuator by cutting a cylinder of ceramic or electrode material to form two interposed helices and then introducing electrode or ceramic material into the cut grooves between the helices; (ii) production of the above piezoelectric actuator by extrusion of the individual layers to produce a helical layer sequence; (iii) an apparatus for carrying out process (ii), comprising an extrusion unit with a combination

of nozzles for simultaneously producing the layers of the actuator; and (iv) production of the above piezoelectric actuator by subjecting a foil of the layers to stamping to form annular discs with an additional radial cut edge and then twisting and stacking the discs to form a helix.



⑮ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 198 14 697 C 1

⑤ Int. Cl.⁶:
H 01 L 41/083
H 01 L 41/09
H 01 L 41/16
H 01 L 41/22
H 02 N 2/00

⑳ Aktenzeichen: 198 14 697.3-35
㉔ Anmeldetag: 1. 4. 98
㉕ Offenlegungstag: -
㉖ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 21. 10. 99

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

㉗ Patentinhaber:
Lupasco, Doru Constantin, Dr., 64285 Darmstadt,
DE

㉘ Vertreter:
Gägel, R., Dipl.-Phys.Univ. Dr.rer.nat., Pat.-Anw.,
81241 München

㉙ Erfinder:
gleich Patentinhaber

㉚ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

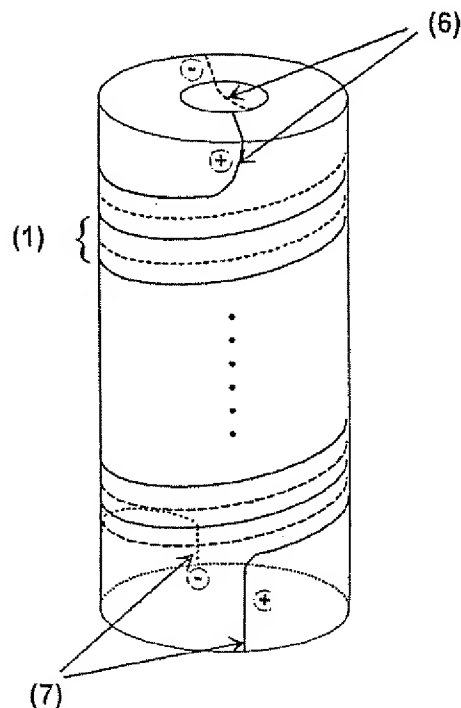
CH	2 81 793
US	55 92 042
US	55 59 378
US	39 00 748
WO	98 09 339 A1
JP	01-25 583 A2

㉛ Piezoelektrischer Aktor und Verfahren zu seiner Herstellung

㉜ Die vorliegende Erfindung betrifft einen piezoelektri-
schen Aktor, insbesondere einen keramischen Vielschicht-
aktor, sowie Verfahren zu seiner Herstellung.

Da Keramiken nur relative Längenänderungen bis zu we-
nigen Promille erlauben, werden oft Vielschichtaktoren
verwendet, die bisher aus aufeinanderfolgenden ebenen
Lagen jeweils von Elektrode und Keramik hergestellt wer-
den. Zur Kontaktierung der einzelnen Elektrodenlagen
sind dann schädigungsanfällige Kammstrukturen bzw.
komplexe und kostenintensive äußere Kontaktierungen
nötig.

Der erfindungsgemäße piezoelektrische Aktor weist eine
Schichtfolge (1) mit zumindest einer Vielfachschicht auf,
die sich aus zwei Schichten aus Elektrodenmaterial, zwi-
schen denen eine Schicht aus piezoelektrischem Material
liegt, und einer weiteren Schicht zusammensetzt, wobei
die Schichtfolge (1) zu einer Spirale beliebiger Windungs-
zahl geformt ist. Diese Geometrie enthält keine inneren
Kanten und nur zwei externe Kontaktpunkte (6, 7). Damit
ist sie wenig schädigungsanfällig. Ihre Herstellung im
Schnittverfahren, durch Pastenabscheidung, in Folien-
technik oder in Freiformtechnik ist einfach durchzuführen.



DE 198 14 697 C 1

DE 198 14 697 C 1

Die vorliegende Erfindung betrifft einen piezoelektrischen Aktor, insbesondere einen keramischen Vielschichtaktor, sowie Verfahren zu seiner Herstellung.

Piezoaktoren im Sinne dieser Erfindung sind Bauteile aus einem piezoelektrischen beziehungsweise elektrostriktiven Material, vorzugsweise Keramik, mit zwei oder mehr elektrisch leitenden Kontaktflächen, die ihre Geometrie beim Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes ändern und Bewegungen und Kräfte erzeugen können.

Piezoelemente sind seit vielen Jahren unter anderem als präzise regelbare Wegstelleinrichtungen in der Mikrosteuertechnik, als Schall- und Ultraschallgeber, als Ultraschallmotoren und in makroskopischen Stell- und Schaltgliedern (Aktoren) im Einsatz.

Auch bei den besten Piezokeramiken werden jedoch nur relative Längenänderungen bis maximal 1 Promille erreicht (neuere Forschungsergebnisse in elektrostriktiven Materialien versprechen größere Wege), so daß versucht wird, die im Material maximal möglichen Wege technisch voll auszunutzen.

Derzeit favorisierte Materialien sind ferroelektrische Materialien, die nach einer Polung meist bei höherer Temperatur in einem externen elektrischen Feld eine Vorzugsrichtung der inneren elektrischen Polarisierung des Materials zeigen. Aufgrund dieser Vorzugsrichtung ist es möglich, den durch die statistische Verteilung der Körner in einer Keramik sonst effektiv nicht beobachtbaren Piezoeffekt zu erzeugen. Jeder einzelne Kristallit ändert unter dem angelegten Feld seine äußeren geometrischen Abmessungen. Bei der Polung und insbesondere bei nachfolgenden Umpolungen des Materials dehnen sich die Kristallite zwar in der Summe in einer Richtung, aber im einzelnen statistisch aus. Diese Ausdehnung führt zu inneren mechanischen Verspannungen an den Korngrenzen, die zum Teil durch innere Domänenverschiebungen im Korn wieder kompensiert werden können. Sind die Verspannungen zu groß, führen sie zu innerem Bruch. Dabei werden zwei Vorgänge unterschieden, der Mikrobruch, bei dem einzelne oder wenige Körner meist an den Korngrenzen brechen, und der Makrobruch, bei dem z. B. ein Piezoelement vollständig geteilt oder über größere Strecken durchrisen wird (100 Mikrometer und mehr).

Um den Einsatz auch mit niedrigen elektrischen Spannungen zu ermöglichen (nötige Felder in der Größenordnung einige kV/mm) werden heutzutage sehr dünne Lagen der piezoelektrischen Keramik verwendet. In diesem Fall kann die Größenordnung des Mikrobruchs und des Makrobruchs identisch werden.

Zur geometrischen Vergrößerung der Stellwege sind verschiedene Wege eingeschlagen worden. Einerseits wurde versucht, durch geeignete Geometrie des Piezoelements selbst, größere Wege zu erzeugen (Unimorphs, Bimorphs, Rainbow, siehe K. Uchino, "Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors", Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1997) beziehungsweise die kleinen Wege, aber großen Kräfte, durch mechanische Vorrichtungen unter Anwendung verschiedenster Hebel zu größeren Wegen hin zu vergrößern (Moonie, Mechanische Wegverlängerung, Öldruck-Wegverlängerung, hierzu viele Beispiele in K. Uchino, "Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors", Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1997). Eine Möglichkeit zur Erzeugung solcher Hebel liegt in dem Aufbau piezoelektrischer Elemente auf die Oberfläche einer axialen Feder. Hierzu sind zwei Beschichtungsformen bekannt. Die eine erzeugt eine Torsionsspannung in den Federwindungen mit Hilfe spiralförmig aufgebracht

Die zweite Ausführung nutzt die gleiche Torsionsspannung, die jedoch durch eine um 45° bezüglich des Windungsverlaufes gekippte Hauptdehnungsrichtung der Keramik hervorgerufen wird (WO 98/09339). Beide Aktorformen nutzen die große Wegverlängerung durch die Feder als Hebel, verlieren hierfür aber mit einem entsprechenden Anteil ihre Übertragungskraft.

Zur Erzeugung von Drehmomenten sind Torsionsaktoren in Spiralförmigkeit bekannt. Diese Aktoren sind entweder als planare Spirale gestaltet (CH 281 793; US 5,559,387) oder als axiale Spirale (CH 281 793). Eine andere planare Spiralgeometrie von piezoelektrischen Elementen nutzt die radiale Dehnungsinkompatibilität zwischen einem Substrat und der entsprechenden Piezokeramik aus, um entlang der Wickelachse der Spirale eine Kraft bzw. eine Wegänderung zu erzeugen (US 5,592,042). Dementsprechend würde man dem Verhalten des gesamten Bauteils wie im Fall der Moonies- und Rainbow-Aktoren eine d31 Charakteristik zuordnen, obwohl die Piezokomponente d33 der Keramik selbst ausgenutzt wird. Diese Bauform hat den großen Nachteil, daß sie das Bauteil großen Scherspannungen aussetzt. Eine weitere planare spiralförmige Piezoanordnung nutzt die radial auftretenden Kräfte als Schallsensor (JP 1-25583 (A)). Die d33-Komponente der Keramik liegt hier radial.

Der Betrieb von Piezoelementen bei hohen Frequenzen erfordert oft nicht längere Wege sondern eine Anpassung der mechanischen Impedanz. Hierfür sind zahlreiche Lösungen gefunden worden (siehe R. E. Newnham, "Molecular Mechanisms in Smart Materials", MRS Bulletin 22 [5], 20-33 (1997), oder L. E. Cross, "Ferroelectric Materials for Electromechanical Transducer Applications", Jpn. J. Appl. Phys. 34 (Part 1, No. 5B), 2525-2532 (1995)).

Der inzwischen fast klassische Vielschichtaktor ist die technisch einfachste Lösung, mit kleinen elektrischen Spannungen große mechanische Kräfte und vertretbare Wege zu erzeugen. Für die Nutzung dieses Bauteils in einer Vielzahl von Anwendungen sind Standzeiten von vielen 10⁹ Zyklen nötig. Beim Betrieb des Aktors mit Umpolung der Keramik sind derzeit 10⁴-10⁶ Zyklen möglich, bei unipolarem Betrieb 10⁸, jedoch mit sehr starker Streubreite, die den kommerziellen Einsatz bei der Qualitätssicherung verhindert.

Die hohen Zyklenzahlen werden bereits von Aktoren erreicht, die keine inneren Elektrodenkanten besitzen (siehe Fig. 3 mit inaktiven (IL) und aktiven Schichten (AL), internen (IE) und externen Elektroden (EE), einer Isolation (IS) sowie der piezoelektrischen Keramik (PC)) und mechanisch vorgespannt werden. Diese Bauform ist jedoch durch die komplizierte Kontaktierung der vielen Elektroden in der Herstellung sehr teuer (S. Takahashi, "Longitudinal Mode Multilayer Piezoelectric Actuators", Ceramic Bulletin 65 [8], 1156-1157 (1986)). Dabei spielt es keine entscheidende Rolle, ob die Aktorschichten nach dem Sintervorgang der Keramik zusammengefügt werden, oder ob die Keramik und die Elektroden gleichzeitig gesintert werden.

Eine billigere Variante stellt die Herstellung in der Kammstruktur (siehe Fig. 2 mit internen (IE) und externen Elektroden (EE)) und ihren Abwandlungen (vgl. K. Uchino, "Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors", Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1997) dar, die der Herstellung der Vielschichtkondensatoren entlehnt ist (S. W. Freiman, R. C. Pohanka, "Review of Mechanically Related Failures of Ceramic Capacitors and Capacitor Materials", J. Am. Ceram. Soc. 72 [12], 2258-63 (1989)) und meist in einem einzigen Sinterschritt der Keramik zusammen mit den Elektroden erfolgt. Bei dieser Geometrie treten an den Enden der Elektroden in der Keramik jedoch hohe elektrische Felder und daraus resultierend starke mechanische Zugspannungen auf. Dies konnte sowohl experimentell

als auch durch analytische und Finite-Elemente-Rechnungen gezeigt werden.

Starke Zugspannungen treten ebenfalls an den Kontaktstellen der Elektroden mit ihren äußeren Zuführungen (Kammrücken) bei der Verlängerung des Aktors als ganzes Bauteil auf. Da Keramiken gegen Zugspannungen sehr empfindlich sind, führt dies zu einem Versagen des Bauteils an diesen Stellen, wie für verschiedene Materialien gezeigt wurde (K. Uchino, s. o.). Zwei Schädigungsformen des makroskopischen Bruchs werden hierbei unterschieden, der Bruch parallel zu den Elektrodenflächen, falls er direkt an der Elektrodenfläche auftritt auch als Delamination bezeichnet, und der Bruch senkrecht zu den Elektrodenflächen. Diese zweite Form des Bruchs reicht oft bis zur Gegenelektrode und zieht dann meistens einen elektrischen Durchschlag nach sich. Dies führt zum endgültigen Versagen des Bauteils.

Der Einfluß von Delaminationsbrüchen und Brüchen parallel zu den Elektroden kann durch die mechanische Vorspannung des gesamten Aktors in ihrer Auswirkung sehr stark reduziert werden. Im Allgemeinen läßt sich daher ein Aktor auch mit Delaminationsbrüchen bei mechanischer Vorspannung noch bis zu Zyklenzahlen annähernd in der gleichen Größenordnung wie ohne diese Brüche betreiben. Die Delaminationsbrüche erstrecken sich bis in den Kontaktierungsrücken der Kammstruktur und zerstören somit die elektrische Zuführung bzw. Verteilung des anregenden elektrischen Feldes.

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung einen piezoelektrischen Aktor sowie Verfahren zu seiner Herstellung anzugeben, der einfach kontaktierbar ist und vertretbare Stellwege bei verminderter Bruchgefahr aufweist, so daß eine hohe Standzeit ermöglicht wird.

Die entscheidende Lösung zu den aufgezeigten Problemen des Standes der Technik ist die einfach herzustellende Aktorgeometrie des erfindungsgemäßen Piezoaktors nach Anspruch 1, ohne innere Elektrodenkanten und -ecken. Vier Verfahren sowie eine Vorrichtung zu seiner Herstellung werden durch die Ansprüche 30, 55, 72, 79 und 68 angegeben. Bevorzugte Ausgestaltungen sind Gegenstand der Unteransprüche.

Der erfindungsgemäße Piezoaktor besteht aus einer Schichtfolge, die zumindest eine Vierfachsicht mit zwei Schichten aus Elektrodenmaterial, die eine Schicht aus Keramik einschließen, und einer weiteren Schicht umfaßt. Diese Schichtfolge ist zu einer Spirale bzw. Helix beliebiger Windungszahl geformt.

Die Schichtfolge besteht vorzugsweise aus zwei Lagen Keramik, die jeweils durch die Elektrodenschichten getrennt werden. Jede der somit vier Lagen ist als Helix ausgeführt. Betrachtet man hierbei die Schichten aus Elektrodenmaterial (d. h. die Elektroden des Piezoaktors) bzw. die Schichten aus Keramik, so bilden diese eine Doppelhelixgeometrie. Alle Lagen zusammen bilden einen Hohlzylinder mit einer inneren Öffnung, die zumindest so groß zu gestalten ist, daß ein Kurzschluß durch den Kern der Doppelhelix verhindert wird. Vorzugsweise kann hierzu ein hochisolierendes Material in die Öffnung eingebracht werden. Im Allgemeinen sind größere Öffnungen zu bevorzugen. Bei der Polung der Keramik werden die beiden Lagen aus Keramik gegensinnig (entgegengesetztes Vorzeichen) aber annähernd parallel zur äußeren Dehnungsrichtung der Doppelhelix polarisiert. Da der Piezoeffekt parallel zu der bei Polung angelegten Feldrichtung ist, dehnen sich die beiden Lagen Keramik im gleichen Sinne aus, wie dies auch in den Kammstruktur-Vielschichtaktoren des Standes der Technik ausgenutzt wird. Die durch die leichte Verkipfung der Polarisationsrichtung in der Helixgeometrie auftretenden mechani-

schen Verspannungen verteilen sich auf die ganze Fläche der Doppelhelix und werden somit an keiner Stelle sehr groß.

Die Zuführung der Elektroden sollte vorzugsweise als eine abgerundete Führung am Ende der Helix gestaltet werden (siehe Bezugszeichen (6) und (7) in den Fig. 1 und 4). Werden diese Zuführungen nicht in dieser Form ausgeführt, dann ist die Wahrscheinlichkeit des mechanischen Versagens an diesen Kanten am größten. Zwischen den im Abstand der halben Ganghöhe der Helix liegenden Elektroden (normaler Elektrodenabstand) herrscht das maximale elektrische Feld und damit die maximale mechanische Dehnung. Bei winkliger Fortführung der Elektroden läge dann direkt daneben ein Bereich, der quasi keine Dehnung erfährt. Diese Dehnungsinkompatibilität erhöht an dieser Stelle die Bruchgefahr. Bei abgerundeter Führung verteilt sich die mechanische Verspannung auf den ganzen Krümmungsbogen der jeweiligen Zuführungselektrode (6), (7).

Der erfindungsgemäße Piezoaktor kann selbstverständlich auch derart gestaltet sein, daß die zu einer Spirale geformte Schichtfolge aus nur einer Schicht aus Keramik (oder anderem piezoelektrischen Material) zwischen den beiden Elektrodenschichten sowie einer Isolationsschicht zusammengesetzt ist. Die Isolationsschicht dient hierbei zur Isolation der beiden Elektrodenschichten voneinander, die ansonsten bei Bildung der Spiralforn aufeinander liegen würden.

In der bevorzugten Ausführungsform ist jedoch anstelle der Isolationsschicht eine weitere aktive Keramiksicht vorgesehen.

Weiterhin ist der erfindungsgemäße Piezoaktor nicht auf eine Schichtfolge aus einer einzigen Vierfachsicht begrenzt (vgl. Anspruch 8). Bei Verwendung von drei Vierfachsichten ergibt sich beispielsweise eine 3-gängige 4-fach-Helix, bei der drei Helices mit einem Versetzungswinkel von 120° ineinandergeschachtelt sind.

Als Materialien für die piezoelektrische Schicht eignen sich alle ferroelektrischen Keramiken. Beispiele hierzu bilden insbesondere das PZT-System (Blei-Zirkonat-Titanat-Mischkeramik, $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, $0,45 \leq x \leq 0,55$), das durch geeignete Dotierungionen zu "weichem" bzw. "hartem" Verhalten gezüchtet wird (Xu, Yuhuan: "Ferroelectric Materials and their Applications", Elsevier, Amsterdam (NL), 1991). Weiche PZT's zeigen ausgeprägte Hysteresen bei Raumtemperatur und meistens sehr große Werte für die Piezokonstante (d_{33}), die jedoch bei bipolarer Nutzung des Aktors sehr schnell depolarisieren und zeitlich fallende d_{33} -Koeffizienten zeigen. PZT's mit "hartem" Verhalten haben bei Raumtemperatur lediglich eine antrainierbare Hysteresen. Man benötigt lange Polungszeiten bei möglichst hohen Temperaturen und erzielt geringe aber zeitlich sehr stabile Piezokoeffizienten. Ebenso eignen sich Systeme wie Ba-TiO₃ und ähnliche Ferroelektrika.

Ferner eignen sich alle elektrostriktiven (S. Yoshikawa, Namchul Kim, T. Shrout, Q. Zhang, P. Moses, L. E. Cross, "Field-Induced Lead Zirconate Titanate Stannate Antiferroelectric-to Ferroelectric Phase Switching Ceramics", SPIE 2441, 223-232 (1996)) sowie Relaxor-Materialien (L. E. Cross, "Relaxor Ferroelectrics: An Overview", Ferroelectrics 151, 305-320 (1994)). Diese beiden Klassen von Materialien werden nicht gepolt, sondern zeigen eine zum angelegten Feld parallele Dehnung, sofern die kristallografischen Orientierungen dies zulassen. Es entstehen aufgrund der statistischen Orientierungsverteilung der Kristallite wie im vorherigen Fall mechanische Verspannungen die zum Versagen des Materials führen können. Eine Konzentration dieser Verspannungen bei hohen Feldern an den Elektrodenspitzen ist ebenso gegeben, wie für ferroelektrische Keramiken.

Beispiele zu diesen Materialien sind PMN (Blei-Magnesium-Niobat, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$), das Mischsystem PMN-PT ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ - PbTiO_3), das System PZST (Blei-Zinn-Zirkonat, $(\text{Pb}_{0.97}\text{La}_{0.02})(\text{Zr}_{0.66}\text{Ti}_{0.11-x}\text{Sn}_{0.23+x})\text{O}_3$) und auch PLZT (Blei-Lanthan-Zirkonat-Titanat, $(\text{Pb}_{1-y}\text{La}_y)(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) für geeignete Lanthankonzentrationen (G. H. Heartling, "PLZT Electrooptic Materials and Applications-A Review", *Ferroelectrics* 75, 25-55 (1987)).

Eine gute Elektrodenqualität ist für die Lebensdauer eines Aktors ebenfalls von großer Bedeutung. Hierbei spielt insbesondere die Degradation durch von der Elektrode ausgehende Mikrorisse eine große Rolle (M.-J. Pan, S.-E. Park, K. A. Markowski, S. Yoshikawa, C. A. Randall, "Superoxidation and Electrochemical Reactions during Switching in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.* 79 (6), 2971-2974 (1996)). Sie führt zu einer Zermürbung des Materials, die man bis zur Zersetzung hin zu einzelnen Körnern beobachten kann (D. Lupascu, M. Christmann, J. Nuffer, J. Rödel, "Microcrack Degradation in Ferroelectrics Monitored by Acoustic Emission", in Vorbereitung). Dieses Problem kann auch von der Helixgeometrie nicht prinzipiell gelöst werden.

Als Elektroden werden in der Regel die Metalle Ag, Ni, Au, Mn, Pd, Ag/Pd oder Pt eingesetzt, wobei die preiswerten Nickelelektroden keine so gute Stabilität zeigen, wie zum Beispiel teure Platin-Elektroden. Palladium und Silber/Palladium stellen derzeit einen Kosten/Nutzen-Kompromiß dar. Ferner wird seit einiger Zeit mit metallisch leitenden oxidischen Elektroden experimentiert z. B. RuO_2 (siehe US 5619393).

Folgende bekannte Techniken können zur Auftragung der Elektroden eingesetzt werden: Bedampfen, Sputtern, Pastenauftragung, chemische Abscheidung (z. B. Ionentauschverfahren oder Silberspiegelverfahren, mit nachfolgender mechanischer Nachbearbeitung zur Entfernung von Überschußmaterial) und Pulverauftragung. In den meisten Fällen werden die aufgetragenen Elektroden dann in einem weiteren Prozeßschritt durch Einbrennen in die darunterliegende Piezokeramik fest mit dem Aktorwerkstoff verbunden. Niedrig schmelzende Legierungen können auch flüssig aufgetragen, eingegossen oder infiltriert werden. Bevorzugte Aufbringungsverfahren für das Elektrodenmaterial auf eine erfindungsgemäße piezokeramische Helixstruktur sind beispielsweise Pastenauftragung, chemische Abscheidung, Pulverauftragung oder Infiltration.

Bei jedem thermischen Prozeßschritt treten beim Phasenübergang zwischen der meist kubischen Hochtemperaturphase der Keramik und der piezoelektrischen Phase unterhalb der Curietemperatur starke mechanische Verspannungen auf, die zu starker Mikrorißbildung führen (V. Srikanth, E. C. Subbarao, "Acoustic Emission in Ferroelectric Lead Titanate Ceramics: Origin and Recombination of Microcracks", *Acta metall. mater.* 40 (5), 1091-1100 (1992)). Um die Anzahl der thermischen Prozeßschritte u. a. auch aus Kostengründen zu minimieren, können Metall- und Keramikschichten zu einer Vielschicht-Vorform, entweder durch Pasten- oder Pulverabscheidung oder durch den erfindungsgemäßen Vielschicht-Folienstapel (siehe Anspruch 72) zusammengestellt und dann in einem gemeinsamen Schritt gesintert werden.

Oxidische Elektroden werden im Allgemeinen gleichzeitig mit der piezoelektrischen Keramik gesintert. Die Techniken hierfür finden insbesondere in der Mikroelektronik Anwendung, wo die Mikrobrüche durch mechanische Fehlanpassungen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Metallen und den Oxidkeramiken schwerwiegende Folgen haben.

Ein Verfahren zur Herstellung des erfindungsgemäßen

Aktors besteht in dem im folgenden erläuterten Schnittverfahren. Legt man eine gerade Linie durch die Mitte einer der kreisrunden Zylinderflächen, dann wird diese Fläche in zwei Teile geteilt. Nimmt man diese Linie als Schnittlinie einer fadenförmigen Säge (endlicher Schnittbreite), dann teilt diese den Zylinder längs der Zylinderachse in zwei Hälften. Wird der Zylinder bei dem Schnitt bei gleichzeitigem Vortrieb um seine Rotationsachse gedreht, dann bilden diese beiden Teile ineinandergefügte Helizes. Ist der Vortrieb solch einer Anordnung (vgl. Fig. 9) mit einem bestimmten Hub versehen, dann hat jede der 4 Helizes (2 Keramik, 2 Elektroden) des späteren Aktors den gleichen Hub (bzw. Ganghöhe), jedoch ineinander geschachtelt. Bei seitlicher Ansicht des Aktors sind Keramikschichten und Elektroden-schichten jeweils im Abstand der halben Ganghöhe zu sehen.

Nach dem Schneiden des Zylinders werden schließlich die Elektroden-schichten in die resultierenden Spalte zwischen den beiden ineinandergefügten Helizes aus Keramik eingebracht. Dies geschieht vorzugsweise durch das Einpressen als Pasten, Pulver, Flüssigkeiten oder Suspensionen in eine Form, in der sich auch der Aktorrohling (d. h. die beiden ineinandergefügten Helizes) befindet. Auf diese Weise werden alle Zwischenräume mit dem amorphen Elektroden(roh)material gefüllt. Nach einem gemeinsamen und/oder getrennten Sintervorgang (vgl. z. B. Anspruch 53) wird überschüssiges Material an den Aktoraußen- und innenseiten entfernt (beispielsweise durch ausbohren, abdrehen, schleifen, ätzen etc.).

Natürlich kann auch ein Zylinder aus Elektrodenmaterial geschnitten werden. In diesem Fall werden nachfolgend die Schichten aus Keramik gemäß den eben beschriebenen Techniken in die Zwischenräume eingebracht.

In der Mitte des Zylinders wird entlang der Zylinderachse eine Öffnung mit dem Durchmesser des Schnittes freigeschnitten. Bei ungenauer Führung wird der Durchmesser der Öffnung größer. Weicht der Schnitt mehr als den halben Schnittdurchmesser von der Zylinderachse ab, dann bleibt in der Mitte ein Steg anstelle der Öffnung stehen. Deshalb ist es ratsam, den Schnitt bereits an einem Hohlzylinder durchzuführen. Dadurch wirken sich kleine Fehler beim Schnitt nicht so sehr aus. Welches der in den Ansprüchen formulierten Schnittverfahren benutzt wird, ist vom jeweiligen Material und den Prozessvoraussetzungen des Herstellers des Helixaktors abhängig.

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung des erfindungsgemäßen Aktors besteht in einem Extrusionsverfahren zur Pastenabscheidung.

Für die Hybridtechnik werden seit geraumer Zeit auch Pasten verwendet, die einen hohen Anteil keramischer Pulver, bzw. einen hohen Metallgehalt für die Elektroden enthalten (Pepin, J. G., "Multilayer ceramic capacitor electrodes: powder technology and fired properties", *Journal of Materials Science., Mater. Electron.*, 2[1]34-9 1991). Diese Pasten werden z. B. mit Siebdruckmaschinen in der Schichttechnik aufgebracht. Kürzlich ist hierzu ein Schichtverfahren bekannt geworden, das die Elektroden und die Keramikschichten eines Vielschichtaktors abwechselnd abscheidet (Okawa Y; Chikaoka Y; Sakaida A; Suzuki Y; Ikezaki Y, METHOD FOR PRODUCING A LAYERED PIEZOELECTRIC ELEMENT, US 5639508, 1997, Brother Kogyo KK, 17. Juni 1997). Die für den vorliegenden erfindungsgemäßen Piezoaktor relevante Technik ist das gleichzeitige Abscheiden der Pasten aus mehreren Düsen. Dies ist notwendig, um bei Rotation die ineinanderliegenden 4 Helizes darstellen zu können. Die zumindest notwendige Anzahl von vier Düsen ist durch die minimal nötige Anzahl an Schichten vorgegeben. Mehrfache Düsenöffnungen, die le-

diglich zu einer besseren Verteilung der Paste dienen, sind in diesem Prinzip mit eingeschlossen. Ebenso Vielfache der Anzahl der Düsen, die lediglich die Vierfach-Schichtfolge mehrmals darstellen.

Um einen Pasten-Zylinder bzw. -Hohlzylinder großer Höhe (Ausdehnung entlang der Zylinderachse) herstellen zu können, müssen die Pasten in eine mechanische Form hinein abgeschieden werden. Diese sollte aus einem sich bei hohen Temperaturen gut zersetzenden Material gefertigt sein. Hier kommen Kunststoffe oder harte Pappen in Frage. Die Vorform sollte ferner vorzugsweise die innere Öffnung des Hohlzylinders bereits enthalten, um eine mechanische Bohrung des fertigen Aktors zu vermeiden. Auch bei sehr guten Pasten und Formgebung der Düsen ist es nicht vermeidbar, daß sich die Pasten der verschiedenen Schichten in der Mitte eines Vollzylinders treffen. Dies ist auf jeden Fall durch eine innere Öffnung zu verhindern. Ob die äußere Form des Aktors dann kreiszylindrisch gewählt wird oder nicht, ist für die Funktionsweise und auch für die Lebensdauer kaum relevant, obwohl Ecken und Kanten auch hier vermieden werden sollten. In der Herstellung am einfachsten ist sicherlich der kreisrunde Zylinder.

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung des erfindungsgemässen Aktors besteht in einem bindenden Freiformverfahren, im folgenden Freiform-Verfahren genannt.

In einer Lösung aus Polymeren mit Anteilen, die geeignet sind eine entsprechende Keramik zu bilden und weiterhin organischen Gruppen, die fähig sind durch UV-Licht zu binden, kann eine komplexe Struktur durch Bestrahlung mit UV-Licht erzeugt werden (Danforth, S. C., Safari, A., "Solid Freeform Fabrication: Novel Manufacturing Opportunities for Electronic Ceramics", IEEE Int. Symp. On Appl. of Ferroelectrics 1, 183-188, (1996)). Zur Herstellung der erfindungsgemässen Helixstruktur inklusive aller abgerundeten Enden und eventuellen Stromzuführungen wird diese Geometrie in einem Computer simuliert. Die so generierte erfindungsgemässe Helixstruktur kann durch folgende Schritte direkt auf die Keramikform abgebildet werden. In einem Behälter mit einer geeigneten Lösung von Polymeren wird eine vertikal bewegliche Unterlage an der Oberfläche der Flüssigkeit in diese hineingetaucht. Mit einem fokussierten UV-Strahl wird für die entsprechende Lage Keramik (am Anfang die unterste) das Muster der Keramik mit dem UV-Strahl geschrieben. Die Unterlage wird dann ein ganz kleines Stück weiter in die Flüssigkeit getaucht und die nächste Lage Polymervorform wird gebildet. Diese zwei Schritte werden so lange wiederholt, bis die vollständige erfindungsgemässe Aktorgeometrie gebildet ist. Die Keramik wird dann durch Polymerypyrolyse hergestellt. Weiterhin ist es möglich in die so gebildete feste Vorform des Keramik-Vorpolymers eine weitere geeignete Flüssigkeit mit Metallanteilen oder metallhaltigen Polymeren einzubringen, so dass bei der Pyrolyse sowohl die Keramikstruktur als auch die Elektrodenstruktur in einem thermischen Prozessschritt gebildet werden. Wird lediglich die Polymervorform der Keramik gesintert, dann lassen sich selbstverständlich alle bisher genannten Verfahren zum Einbringen der Metallanteile in eine gesinterte Vorform verwenden. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass auch sehr dünne Schichten insbesondere der piezoelektrisch inaktiven Elektrodenerschicht gebildet werden können. Natürlich sind die zwei Prozessschritte sinngemäß in ihrer Reihenfolge austauschbar, wobei dann Elektroden-Vorformen gebildet werden müssen, die genügend mechanische Stabilität aufweisen, um das Einbringen des keramikbildenden Polymers oder einer anderen keramikbildenden Flüssigkeit oder Paste oder Schlickers zu ermöglichen.

Wählt man geeignete Vorpolymere, eines zur Bildung der

Metallschichten und eines zur Bildung der Keramikschichten, die bei unterschiedlichen UV-Lichtwellenlängen polymerisieren, dann lassen sich Keramik- und Metallanteile mit zwei UV-Strahlen gleichzeitig aus einer Lösung polymerisieren. Die gesamte Geometrie des erfindungsgemässen Aktors wird dann in einem Prozessschritt als Polymervorform erzeugt. Diese Polymervorform wird dann in einem thermischen Prozessschritt zum vollständigen Aktor.

In der Doppelhelixgeometrie als Hohlzylinder ist eine direkte Berührung der zwei Elektroden ausgeschlossen. Um jedoch im Betrieb auch einen Schutz vor Kurzschluß durch Abriebteilchen zu gewährleisten, sollte ein gut elastisches Isolationsmaterial fest mit den Oberflächen der Spirale bzw. Helix verbunden werden. Eine glatte elektrisch isolierende Führung, die nicht in fester Verbindung mit dem Aktor steht, mit einem elektrisch isolierenden Gleitmittel zwischen dieser Führung und dem Aktor ist ebenfalls möglich. Sie sollte aber deutlich weicher als das Elektroden und/oder Piezomaterial sein, um Abrieb zu verhindern.

Die Kontaktierung der Elektrodenenden ist abhängig von der Anwendung. In den Ausführungsbeispielen sind sowohl Zuführungskabel als auch eine Kontaktierung durch die zwei Stirnflächen des Aktors gezeigt. Bei der Herstellung durch Schnitt ist es nicht ohne großen Aufwand zu vermeiden, daß eine der Stirnflächen des Aktors vollständig geteilt wird. Hier führen also dann beide Elektroden aus der Keramik heraus. Da dies auch die Richtung der mechanischen Dehnung ist, muß hier eine gut isolierende, mechanisch feste Platte (36) angebracht werden, die sowohl zur Kraftführung als auch zur elektrischen Isolation des Aktorkörpers gegenüber seiner Umgebung dient. Über Ausnehmungen und/oder Vertiefungen (37) in der mechanisch festen Platte ist ggf. auch eine Führung und ein Schutz der Elektrodenzuleitungen realisierbar. Die Zuführungskabel sind seitlich anzubringen.

Ein großer Vorteil sowohl des Extrusionsverfahrens nach Anspruch 55 als auch des Freiformverfahrens nach Anspruch 79 ist es, daß jeweils eine der Elektroden nicht bis zur jeweiligen Stirnseite geführt werden muß und in diesem Fall vollständig auf fest verbundene Zuführungskabel verzichtet werden kann. Eine der beiden dann metallisch ausgeführten Stirnflächen kann als Masse, die andere als Hochspannungszuführung genutzt werden.

Um die für lange Lebensdauern nötige mechanische Vorspannung zu gewährleisten, kann der Helixaktor in eine externe Vorspannvorrichtung eingebaut werden, wie sie auch für andere Vielschichtaktoren genutzt wird. Da dies beim Einbau meist unter Werkstattbedingungen erfolgt, ist eine Schädigung der bruchempfindlichen Keramik oft nicht zu vermeiden. Die Doppelhelixgeometrie in der Ausführung als Hohlzylinder bietet den großen Vorteil, daß im offenen Kern eine mechanische Führung angebracht werden kann, die gleichzeitig mit zwei metallischen Platten zur Vorspannung der Keramik dient. Die mechanisch vorgespannte Keramik ist dann auch nicht mehr so stark gegen Bruch empfindlich, da sie einerseits keine äußeren keramischen Kanten mehr hat und andererseits bereits unter Drucklast steht. Die äußere Dimension des Aktors wird in dieser Ausführung nicht erhöht, was bei beengten Einbaubedingungen sehr hilfreich sein kann. Ferner ist der bereits vorgespannte und somit unempfindliche Helixaktor leicht handhabbar.

Ein weiterer Vorteil der Doppelhelixgeometrie ist die Tatsache, daß sie gegen Verkippungen und ungleiche mechanische Last an den Stirnflächen deutlich unempfindlicher ist als Kammstrukturen. Da die Doppelhelix weder innere Kanten noch Ecken hat, stehen diese nicht zur Verfügung, um lokal die äußeren mechanischen Spannungen zu erhöhen. Die Last wird gleichmäßig verteilt und der Bruch somit deutlich

unwahrscheinlicher.

Da die Piezoaktoren zu großen Leistungen hin genutzt werden sollen, entsteht beim Schalten der Aktoren eine nicht unerhebliche Wärmemenge. Ein Teil dieser Wärme muß unter bestimmten Betriebsbedingungen künstlich abgeführt werden. Dies ist in vorteilhafter Weise in der Hohlzylindergeometrie inmitten des Aktors durch eine freizulassende Öffnung in der Metallführung bzw. der Vorspannvorrichtung leicht möglich. Unter Umständen reicht diese Kühlung dann vollständig aus, um die Wärme abzuführen. Keine weiteren kühlmitteldichten Behältnisse um den Aktor herum sind dann notwendig.

Die Erfindung soll nachfolgend anhand der Ausführungsbeispiele und der Zeichnungen näher erläutert werden. Hierbei zeigen

Fig. 1 eine Prinzipskizze einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen Piezoaktors;

Fig. 2 einen Vielschichtaktor mit Kammstruktur gemäß dem Stand der Technik;

Fig. 3 einen weiteren Vielschichtaktor des Standes der Technik mit externer Kontaktierung der Einzelelektroden;

Fig. 4 ein Beispiel für einen erfindungsgemäßen Piezoaktor in Schnittansicht;

Fig. 5 den Piezoaktor der Fig. 4 mit isolierendem Kern;

Fig. 6 den Piezoaktor der Fig. 4 mit Metallführung;

Fig. 7 den Piezoaktor der Fig. 4 mit mechanischer Spannvorrichtung;

Fig. 8 den Piezoaktor der Fig. 4 mit Gehäuse;

Fig. 9 den Piezoaktor der Fig. 4 mit Spannscheiben in gespanntem Zustand sowie metallischer Führung, die ein durchlaufendes Rohr zur Kühlung aufweist;

Fig. 10 ein Beispiel für eine mechanische Vorspannung mit Federscheiben in gespanntem Zustand;

Fig. 11 ein Beispiel für einen Schneckenvorschub, wie er beim erfindungsgemäßen Verfahren eingesetzt wird (alle schraffierten Teile im Schnitt; Schnecke in Aufsicht)

Fig. 12 ein Beispiel einer Spannvorrichtung, die als Schraube ausgeführt ist, mit einer Drehmomentsperrscheibe;

Fig. 13 eine weitere Ausführungsform des erfindungsgemäßen Piezoaktors mit ungleich langen Elektrodenenden, wobei die Stirnseiten als Stromzuführungen dienen;

Fig. 14 ein Beispiel für den erfindungsgemäßen Piezoaktor mit mittigen Stromzuführungen und einer Kabelführung durch eine externe Gegendruckplatte hindurch;

Fig. 15 ein Beispiel für den erfindungsgemäßen Piezoaktor mit seitlichen Stromzuführungen;

Fig. 16 ein Beispiel für eine Extrusionseinheit gemäß Anspruch 68;

Fig. 17 ein Beispiel für eine Extrusionseinheit mit Vielfachöffnungen an den Düsen;

Fig. 18 ein Beispiel für eine Vierfach-Schichtstruktur aus Folien, wie sie beim erfindungsgemäßen Verfahren nach Anspruch 72 eingesetzt werden;

Fig. 19 ein Beispiel für gestanzte Ringe aus einer Vierfachsicht, wie sie als Zwischenprodukt beim erfindungsgemäßen Verfahren nach Anspruch 72 auftreten;

Fig. 20 ein Beispiel für eine Unterlage gemäß Anspruch 76;

Fig. 21 ein weiteres Beispiel für eine Unterlage zur Erzeugung eines abgerundeten Verlaufs der Elektrodenenden; und

Fig. 22 ein Beispiel für aus der Folie ausgestanzte streifenförmige Teile für Anfangs- und Endstück (Anspruch 78).

Fig. 1 zeigt eine Prinzipdarstellung einer Ausführungsform des erfindungsgemäßen piezoelektrischen Aktors. Aus der Figur ist die eine Spirale (mit Hohlraum) bildende Schichtfolge (1) aus einer Vierfachsicht deutlich zu er-

kennen. Die Elektroden-schichten ((+), (-)) weisen an den Stirnseiten des durch die Spirale gebildeten Aktors eine abgerundeten Verlauf (6, 7) auf.

Fig. 4 zeigt einen Schnitt durch einen erfindungsgemäßen Aktor mit den beiden Schichten aus Elektrodenmaterial (4, 5), zwischen denen eine Schicht aus Keramik (3) liegt, und einer weiteren Schicht (2), vorzugsweise ebenfalls aus Keramik. Die Schichtfolge (1) ist übereinanderliegend zu einer Spirale geformt.

Als Beispiel wurde mit dem Schnittverfahren ein Piezoaktor, wie er in den Fig. 1 bzw. 4 dargestellt ist, mit folgenden Abmessungen hergestellt:

Außendurchmesser:

ca. 2

Innendurchmesser:

ca. 6

Höhe des Aktorkörpers:

ca. 4

Höhe des Helixabschnittes:

ca. 2

Windungszahl:

ca. 1

Ganghöhe:

ca. 2

Schnittbreite:

ca. 0

abgerundete Elektrodenzuführung:

ca. 1

Es sind verschiedene Steigungen bzw. Ganghöhen der Spirale möglich. Die Ganghöhe sollte jedoch nicht zu groß gewählt werden, damit die elektrischen Feldkomponenten senkrecht zur Ausdehnungsrichtung des Aktors nicht zu groß werden. Über die Variation der Ganghöhe der Spiralen bzw. Helixstruktur kann ein vorgegebener oder gewünschter Verlauf des elektrischen Feldes im Aktorkörper zumindest mit hinreichend guter Näherung erreicht werden. Derzeit gängige Finite-Elemente-Programme können genutzt werden, um näherungsweise die Feldüberhöhungen zu berechnen. Die Vorzeichen der elektrischen Spannung sind nur zur Orientierung eingezeichnet und können auch umgekehrt verwendet werden. Eine bei der Polung ferroelektrischer Keramiken mit (+) beaufschlagte Elektrode sollte auch im Betrieb in dieser Polungsrichtung betrieben werden.

Ein Aufbau der Spirale mit steigender Ganghöhe zu den Stirnflächen des zylinderförmigen Aktors hin (vgl. Anspruch 10) entspricht einer abgerundeten Zuführung der Elektroden, jedoch mit so kleiner Rundung, daß die Zuführung sich wie eine sehr steile Helix gestaltet.

Eine Isolation (8) an den Randflächen der Spirale kann durch Lacke, Polymere, Öle oder andere hochisolierende Stoffe gewährleistet werden. Ob dabei eine feste Verbindung zum Aktormaterial gewählt wird, hängt von der Anwendung ab. Beispiele zu Formen der Isolation (8, 17) sind in den Fig. 5, 6, 7 und 8 zu sehen.

Hierbei zeigt Fig. 6 einen Piezoaktor mit mechanischer Führung (9) aus Metall in dem durch die Spirale gebildeten Hohlraum. Fig. 7 stellt ein Beispiel für eine mechanische Führung (11) dar, die gleichzeitig als mechanische Spannvorrichtung für den Piezoaktor dient. Bezugszeichen (17) bezeichnet isolierende Ringe an den Stirnflächen.

Fig. 8 zeigt einen Piezoaktor, bei dem die Führung (10) in ein Gehäuse (10, 14) des Piezoaktors integriert ist, wobei Bezugszeichen (14) eine Verschlusskappe des Gehäuses darstellt.

Eine weitere Möglichkeit eines Gehäuses ist das gleichzeitig als Spannvorrichtung dienende Gehäuse (30, 31, 32) der Fig. 12.

Fig. 9 zeigt ein weiteres Beispiel für einen Piezoaktor mit metallischer Führung. Hierbei wurden (an den Stirnflächen) Spannscheiben zur mechanischen Vorspannung eingesetzt, die in gespanntem Zustand dargestellt sind. Die mechanische Führung (12) ist als Rohr gefertigt, in dessen Innerem (13) eine Kühlflüssigkeit zirkuliert. Hierdurch wird auf ein-

fache Weise eine Kühlung des Piezoaktors erzielt.

Eine Möglichkeit der mechanischen Vorspannung ist in der Spannvorrichtung (30, 31, 32) der Fig. 12 als Schraubversion gegeben. Die Spannvorrichtung beinhaltet auch eine Sperrscheibe (31), um eine Übertragung des Drehmomentes auf den Piezoaktor beim Verschrauben zu verhindern. Die Spannvorrichtung bildet gleichzeitig das Gehäuse (30, 31, 32), das einen sicheren mechanischen Schutz des Bauteils gewährleistet.

Eine weitere Möglichkeit der Vorspannung ist in Fig. 10 durch einen Spannfederstift (16) und eine Spannscheibe (15) gegeben. Zur Montage werden diese, nachdem der Piezoaktor eingesetzt wurde, lediglich fest ineinandergelockt. Fig. 10 zeigt die Federscheiben in entspanntem Zustand.

Ein Beispiel eines Schneckenvortriebes für die Aktorfertigung unter Einsatz der Schnittechnik ist in Fig. 11 dargestellt. Der zu schneidende keramische Vorkörper (21) wird bei Rotation der Welle (23), die in einer Halterung (22) mit Lagern gehalten wird, dadurch gegen den feststehenden Schneiddraht (25) vorangetrieben, daß der Führungsstift (26) in einer helixförmigen Kulissenführung (27) mit abgerundeten Enden auf dem Vortriebszylinder (24) ähnlich wie bei einem Kopierdrehvorgang geführt wird.

Fig. 13 zeigt ein Beispiel eines erfindungsgemäßen Piezoaktors mit ungleich langen Elektrodenenden (27, 29). Hierbei sind die Stirnflächen (28) des Aktors als Kontakte ausgeführt, mit denen die Elektroden auf jeweils einer Seite verbunden sind (29). Dadurch wird eine externe elektrische Kontaktierung des Aktors erleichtert. In diesem Fall müssen jeweils die Elektroden anderer Polarität enden (27), bevor sie die Stirnflächen erreichen. Ein Aufbau dieser Art ist in Schnittechnik etwas schwierig herzustellen. Es bietet sich daher vorzugsweise die Herstellungstechnik des Extrudierens an. Beim Extrudieren kann zu geeignetem Zeitpunkt einfach die Extrusion einer der Elektroden ausgesetzt werden, um die in Fig. 13 dargestellte Struktur zu erzeugen.

Eine Kontaktierung der Elektroden im Inneren des Hohlzylinders ist ebenfalls möglich, wie in Fig. 14 dargestellt ist. Die äußere mechanische Stütze (33), gegen die die mechanischen Hübe des Aktors letztendlich arbeiten müssen, enthält in diesem Fall eine Bohrung zur Durchführung der Kabel (34).

Eine Kontaktierung von außen kann beispielsweise in der Form angelöteter, angesinterter oder eingesteckter externer Anschlußleitungen (35) bestehen (siehe Fig. 15). Hier führen beide Elektroden aus der Keramik heraus. Die gut isolierende, mechanisch feste Deckplatte (36) dient sowohl zur Kraftführung als auch zur elektrischen Isolation des Aktorkörpers gegenüber seiner Umgebung. Über Ausnehmungen und/oder Vertiefungen (37) in der mechanisch festen Platte ist ggf. eine Führung und ein Schutz der Elektrodenzuleitungen realisierbar. Die Zuführungskabel werden seitlich angebracht.

Für einen Extruder zur Herstellung des Piezoaktors ist in Fig. 16 ein Beispiel gegeben. Aus den vier Öffnungen (40; A, B, C, D) werden jeweils keramikhaltige Pasten (oder Polymer-Keramik-Verbunde oder Pyrolyse-Vorpolymere für die Keramik) aus zwei gegenüberliegenden Düsen (A, D) abgeschieden. Aus dem anderen Paar Düsen (B, C) wird dann die metallhaltige Paste (oder Polymer-Metall-Verbund oder Pyrolyse-Vorpolymer für die Elektrode) abgeschieden. Die Zuführungen der zu extrudierenden Materialien (42) sind im Inneren des Extruders geführt. Ein Führungsstab (41) dient dazu, den Hohlraum im Innern der Spirale zu erzeugen, wenn keine Negativform mit innerem Zylinder verwendet wird. Der ganze Extruder oder die Negativform oder beide können gedreht werden.

Ein Beispiel für einen Extruder mit mehrfachen Öffnungen pro Düse (43) für eine bessere Abscheidung in den inneren und äußeren Bereichen der Helix ist in Fig. 17 gegeben. Im Inneren des Extruders befindet sich eine Öffnung (44), die Platz läßt für eine Negativform mit innerem Zylinder.

Für die Herstellung von Vielschichtaktoren wird derzeit im Stand der Technik häufig auf die Folientechnik zurückgegriffen. Hierbei werden Keramikgrünfolien aus einem Schlicker gewonnen. Unter Schlicker ist hierbei eine Suspension aus Piezokeramikmaterial in geeigneten Trägerflüssigkeiten (Wasser, Ethanol, usw.) zu verstehen. Diesen Schlickern auf organischer oder Wasserbasis werden 30--40% Feststoffanteil Keramik, meist ein Dispergierhilfsmittel (z. B. Dolapix® oder Polyacrylsäuren) und ein Binder zugegeben. Nach dem Trocknen verbleibt eine lederartige Folie, die durch den Binder elastisch und fest bleibt. Diese Folie wird im Siebdruckverfahren mit Elektrodenmaterial bedruckt, ausgestanzt und dann zum Vielschichtaktor zusammengefügt. Dieser wird dann anschließend zum fertigen Bauteil gesintert.

Will man sich diese Technik zunutze machen, dann sind aus einer derartigen Grünfolie Doppelhelix-Segmente zu stanzen, die eine radiale Schnittkante enthalten. An dieser Schnittkante lassen sich die Segmente leicht verwinden und dann in Helixform aufeinanderstapeln, so daß sich hieraus ein Doppelhelix-Vielschichtaktor als Grünkörper herstellen läßt.

Fig. 18 zeigt ein Beispiel für eine Vierfachsicht, bestehend aus zwei Elektrodenschichten (45) und zwei Keramik-Grünkörperschichten (46), die benutzt werden kann, um ein Doppelhelixelement in einem Stanzschritt zu erstellen.

Ein einzelnes Segment des Doppelhelixaktors, wie er aus einer Vierfachsicht durch einen einmaligen Stanzschritt hergestellt werden kann, ist in Fig. 19 gezeigt. Ein ringförmiges Segment (48) wird durch eine radiale Stanzkante (47) geteilt. Die Folie (48) aus zwei (Keramik-Elektrode) beziehungsweise vier Schichten (Keramik-Elektrode-Keramik-Elektrode) wird zu einem Spiralsegment (49) des Doppelhelixaktors zusammengesetzt. Von den einfachen Doppelschichten sind zwei zur Erzeugung eines Doppelhelixelementes nötig. (49) zeigt die Schrägansicht eines Doppelhelixelementes. Die ausgestanzten ringförmigen Folien mit Radialschnitt werden kongruent aufeinander gestapelt, wobei alle Radialschnitte (möglichst genau) übereinander zu liegen kommen. Mit Hilfe der erfindungsgemäßen Formgebung für ein Unterteil (50, 52, 53) (siehe Fig. 20 und 21) wird insbesondere erreicht, daß die Endfolien eine entsprechend dem verwendeten Unterteil erfindungsgemäße Formgebung erhalten, und daß die Radialschnittkanten der Zwischenschichten insbesondere um genau eine Ganghöhe (entsprechend der Schichtdicke der Mehr- bzw. Vielschichtfolie) versetzt werden und einander gegenüberstehen. Durch einen abschließenden Sinterprozeß wird diese geometrische Konstellation stabilisiert und erreicht, daß aus den Helix-Teilsegmenten (entsprechend jeder einzelnen Zwischenfolie) durch Versinterung der aneinanderliegenden, um eine Ganghöhe versetzten Schnittkanten eine kontinuierliche, durchgehende Helixstruktur erhalten wird.

Fig. 20 zeigt die Ausführung einer Unterlage (50) der Doppelhelix, wie sie für scharf endende Elektroden eingesetzt wird. Die Höhe des Absatzes (50) entspricht der Schichtdicke der Vierfachsicht. Diese Geometrie ist aufgrund der spitz endenden Elektroden nur nach vorherigen Belastungstests der Keramik zu verwenden.

Fig. 21 zeigt die Ausführung einer Unterlage (52, 53) für die Verwendung mit Doppelhelixelementen mit abgerundeter Elektrodenführung. Mit dieser Unterlage läßt sich der Piezoaktor gemäß Anspruch 9 (siehe Fig. 1, (6)) herstellen.

Die zwei Segmente (52 und 53) werden zusammengefügt, nachdem jeweils ein Folienstreifen Doppelschicht eingelegt und auf seine endgültige Form (55) (siehe Fig. 22) gebracht wurde.

Fig. 22 zeigt gestanzte Folienteile (54), wie sie für eine abgerundete Elektrodenzuführung in Folientechnik verwendet werden können. Hierzu eine Seitenansicht (55), wie diese Streifen in der Vorform gemäß Fig. 21 zum liegen kommen. Diese Folienstücke können nur als Einfachfolie genutzt werden (eine Schicht Keramikgrünfolie und eine Schicht Elektrode).

Patentansprüche

1. Piezoelektrischer Aktor, der eine Schichtfolge (1) mit zumindest einer Vierfachsicht aufweist, die sich aus zwei Schichten aus Elektrodenmaterial (4, 5), zwischen denen eine Schicht aus piezoelektrischem Material (3) liegt, und einer weiteren Schicht (2) zusammensetzt, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Schichtfolge (1) entlang einer geradlinigen Achse zu einer Helix beliebiger Windungszahl geformt ist, wobei bei Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen die beiden Schichten aus Elektrodenmaterial (4, 5) eine Ausdehnung der Schicht aus piezoelektrischem Material (3) in einem Bereich der Helix annähernd parallel zu dieser geradlinigen Achse erfolgt.
2. Piezoelektrischer Aktor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Schicht aus piezoelektrischem Material (3) eine Schicht aus Keramik ist.
3. Piezoelektrischer Aktor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die weitere Schicht (2) eine reine Isolationsschicht ist.
4. Piezoelektrischer Aktor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die weitere Schicht (2) eine Schicht aus Keramik ist.
5. Piezoelektrischer Aktor nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Keramik (2, 3) eine elektrostriktive Keramik ist.
6. Piezoelektrischer Aktor nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Keramik (2, 3) eine ferroelektrische Keramik ist.
7. Piezoelektrischer Aktor nach einem der Ansprüche 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Keramik (2, 3) eine Relaxorkeramik ist.
8. Piezoelektrischer Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtfolge aus mehreren Vierfachsichten besteht.
9. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten aus Elektrodenmaterial an den Enden der Helix in Achsrichtung der Helix verlaufen, wobei der Übergang auf die Achsrichtung durch einen abgerundeten Verlauf der Schichten erfolgt (6, 7), um Feldüberhöhungen im piezoelektrischen Material zu vermeiden.
10. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Steigung der Windungen zu den Stirnflächen der Helix hin zunimmt.
11. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die äußere Form der Helix ein elliptischer Zylinder ist.
12. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die äußere Form der Helix ein n-Eck ist.
13. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Helix von einem Gehäuse (10) aus elastischem, elektrisch isolierendem Material umgeben ist, das in fester Verbindung

mit der Helix steht.

14. Piezoelektrischer Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Helix einen zylinderförmigen Hohlraum bildet, in dem ein elektrisch isolierender Kern (8) vorgesehen ist.
15. Piezoelektrischer Aktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern (8) aus elastischem Material besteht und in fester mechanischer Verbindung mit der Helix steht.
16. Piezoelektrischer Aktor nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern (8) ohne feste mechanische Verbindung mit der Helix steht.
17. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern (8) einen Hohlraum aufweist, in dem eine zusätzliche mechanische Führung (9) für den Aktor verläuft.
18. Piezoelektrischer Aktor nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die zusätzliche mechanische Führung (9) fest mit dem Gehäuse des piezoelektrischen Aktors verbunden ist bzw. einen Teil davon bildet.
19. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 17 oder 18, dadurch gekennzeichnet, daß die mechanische Führung (11) so ausgestaltet ist, daß sie zur mechanischen Vorspannung des piezoelektrischen Aktors dient.
20. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die mechanische Führung (11) als Spannschraube ausgestaltet ist.
21. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die mechanische Führung (11) als Spannniete ausgestaltet ist.
22. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß die mechanische Vorspannung gleichzeitig als Gehäuse (30, 32) des piezoelektrischen Aktors ausgeführt ist.
23. Piezoelektrischer Aktor nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse (32) eine oder mehrere Nuten zum Verankern einer Scheibe (31) enthält, die zur Verhinderung einer Drehmomentübertragung vorgesehen ist, wobei die Scheibe (31) eine oder mehrere Verlängerungen aufweist, die in eine oder mehrere der Gehäusenuten greifen.
24. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 1 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern (8) oder eine darin vorgesehene mechanische Führung (12) eine zusätzliche Öffnung (13) für den Durchfluß eines Kühlmittels aufweist.
25. Piezoelektrischer Aktor nach einem Ansprüche 1 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß Randflächen der Helix eine elastische Beschichtung zur elektrischen Isolation aufweisen.
26. Verwendung des piezoelektrischen Aktors nach einem der Ansprüche 1 bis 25 als Stellglied.
27. Verwendung des piezoelektrischen Aktors nach einem der Ansprüche 1 bis 25 als Ultraschallgeber.
28. Verwendung des piezoelektrischen Aktors nach einem der Ansprüche 1 bis 25 als Ventilsteuerung.
29. Verwendung des piezoelektrischen Aktors nach einem der Ansprüche 1 bis 25 als Sensor.
30. Verfahren zur Herstellung des piezoelektrischen Aktors nach Anspruch 1 mit folgenden Verfahrensschritten:
 - Bereitstellen eines Zylinders aus einem keramischen Material oder einem Elektrodenmaterial;
 - Durchführen eines helixförmigen Schnittes durch den Zylinder, so daß zwei ineinanderliegende Helices entstehen; und
 - Einbringen von Elektrodenmaterial oder kera-

- mischem Material in die durch den Schnitt erzeugten Kerben zwischen den beiden Helices.
31. Verfahren nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß als Zylinder ein Hohlzylinder bereitgestellt wird, und der Schnitt ein fadenförmiger Schnitt ist. 5
 32. Verfahren nach Anspruch 30 oder 31, dadurch gekennzeichnet, daß der Zylinder aus einer vollständig gesinterten Keramik besteht.
 33. Verfahren nach Anspruch 30 oder 31, dadurch gekennzeichnet, daß der Zylinder aus einem Keramik-Polymer Verbundwerkstoff besteht. 10
 34. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 33, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt in einem Vorkörper erfolgt, der danach weiteren thermischen Prozessschritten unterworfen wird. 15
 35. Verfahren nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, daß der Vorkörper aus einer nur teilweise gesinterten Keramik besteht.
 36. Verfahren nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, daß eine Polymervorform verwendet wird, aus der durch Polymerpyrolyse die Keramik hergestellt wird.
 37. Verfahren nach Anspruch 34, dadurch gekennzeichnet, daß eine Spritzguß-Vorform aus einem Keramik-Polymer-Verbund-Werkstoff verwendet wird. 25
 38. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt mit einem Schneiddraht erfolgt.
 39. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt mit einem Laser erfolgt. 30
 40. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt mit einem Ionenstrahl erfolgt. 35
 41. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt mit einem Plasma erfolgt.
 42. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt mit einer Gasflamme erfolgt. 40
 43. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 37, dadurch gekennzeichnet, daß der Schnitt mit einem Flüssigkeitsstrahl erfolgt.
 44. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 43, dadurch gekennzeichnet, daß zur Durchführung des helixförmigen Schnittes durch den Zylinder ein Schneckenvortrieb (24) eingesetzt wird. 45
 45. Verfahren nach Anspruch 44, dadurch gekennzeichnet, daß der Schneckenvortrieb (24) rund gearbeitete Schneckenenden (27) aufweist. 50
 46. Verfahren nach Anspruch 44 oder 45, dadurch gekennzeichnet, daß der Schneckenvortrieb Schneckenenden mit vergrößerter Ganghöhe aufweist.
 47. Verfahren nach einem der Ansprüche 44 bis 46, dadurch gekennzeichnet, daß als Schneckenvortrieb ein Gewinde verwendet wird. 55
 48. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 47, dadurch gekennzeichnet, daß das Einbringen von Elektrodenmaterial oder keramischem Material durch Infiltration eines flüssigen Metalls bzw. einer flüssigen Keramik erfolgt. 60
 49. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 47, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten aus Elektrodenmaterial oder keramischem Material als Pasten eingebracht werden. 65
 50. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 47, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten aus Elek-

- trodenmaterial oder keramischem Material als Pulver eingebracht werden.
51. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 47, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten aus Elektrodenmaterial oder keramischem Material chemisch abgeschieden werden.
 52. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 51, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten aus Elektrodenmaterial zusammen mit der Keramik oder der geschnittenen Vorform kogesintert werden.
 53. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 52, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichten aus Elektrodenmaterial in der Keramik nachgesintert werden.
 54. Verfahren zur Herstellung des piezoelektrischen Aktors nach Anspruch 1 durch Extrusion einzelner Schichten derart, daß eine zu einer Helix geformte Schichtfolge entsteht, die sich zumindest aus zwei Schichten aus Elektrodenmaterial, zwischen denen eine Schicht aus piezoelektrischem Material liegt, und einer weiteren Schicht zusammensetzt.
 55. Verfahren nach Anspruch 54, dadurch gekennzeichnet, daß zur Extrusion Pasten verwendet werden.
 56. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 oder 55, dadurch gekennzeichnet, daß zur Polymerpyrolyse geeignete Polymere verwendet werden.
 57. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 oder 55, dadurch gekennzeichnet, daß Keramik-Polymer-Verbundwerkstoffe verwendet werden.
 58. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 oder 55, dadurch gekennzeichnet, daß Metall-Polymer-Verbundwerkstoffe verwendet werden.
 59. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 58, dadurch gekennzeichnet, daß keramische und metallische Anteile oder keramik- und metallbildende Anteile gleichzeitig extrudiert werden.
 60. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 59, dadurch gekennzeichnet, daß in eine Negativform hinein extrudiert wird.
 61. Verfahren nach Anspruch 60, dadurch gekennzeichnet, daß im Inneren der Negativform ein zylindrischer Kern eine Vorform eines inneren Zylinders des piezoelektrischen Aktors bildet.
 62. Verfahren nach einem der Ansprüche 60 oder 61, dadurch gekennzeichnet, daß die Negativform die äußere Begrenzung eines Vorkörpers des piezoelektrischen Aktors bildet.
 63. Verfahren nach einem der Ansprüche 60 bis 62, dadurch gekennzeichnet, daß die äußere Begrenzung der Negativform ein n-Eck, ein Zylindermantel oder ein elliptischer Zylindermantel ist.
 64. Verfahren nach einem der Ansprüche 60 bis 63, dadurch gekennzeichnet, daß die Negativform aus einem Material bereitgestellt wird, das sich bei den Sintertemperaturen des Materials des piezoelektrischen Aktors zersetzt.
 65. Verfahren nach einem der Ansprüche 60 bis 64, dadurch gekennzeichnet, daß die Negativform rotiert.
 66. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 64, dadurch gekennzeichnet, daß eine rotierende Mehrfachdüse verwendet wird.
 67. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 54 bis 66 mit einer Extrusionseinheit, die zumindest vier Düsen (40; A, B, C, D) aufweist, die gemeinsam abscheiden, so daß die mindestens notwendigen vier Schichten des piezoelektrischen Aktors nach Anspruch 1 gleichzeitig erzeugt werden können.
 68. Vorrichtung nach Anspruch 67, dadurch gekenn-

- zeichnet, daß die Extrusionseinheit eine vielfache Anzahl der vier Düsen aufweist.
69. Vorrichtung nach Anspruch 67 oder 68, dadurch gekennzeichnet, daß die Düsen zur besseren Extrusion durch eine Vielzahl Öffnungen gebildet werden. 5
70. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 67 bis 69, dadurch gekennzeichnet, daß die Düsen in einer rotierenden Mehrfachdüse angeordnet sind.
71. Verfahren zur Herstellung des piezoelektrischen Aktors nach Anspruch 1 mit folgenden Schritten: 10
- Bereitstellen einer Folie, die aus zumindest vier Schichten besteht, davon abwechselnd eine Schicht aus Keramik und eine Schicht aus Elektrodenmaterial;
 - Ausstanzen von Teilsegmenten aus der Folie 15
- derart, daß die Teilsegmente aus ringförmigen Scheiben mit einer zusätzlichen radialen Schnittkante bestehen;
- Verwinden und Übereinanderstapeln mehrerer Teilsegmente derart, daß sich ein helixförmiger 20
- Verlauf der aus den zumindest vier Schichten bestehenden Schichtfolge ergibt.
72. Verfahren nach Anspruch 71, dadurch gekennzeichnet, daß die ringförmigen Scheiben als äußere und/oder innere Begrenzung die Form von n-Ecken 25 aufweisen.
73. Verfahren nach Anspruch 71 oder 72, dadurch gekennzeichnet, daß die Folie aus zwei getrennten Doppelschichten Keramik-Elektrode zusammengesetzt ist.
74. Verfahren nach einem der Ansprüche 71 bis 73, dadurch gekennzeichnet, daß die zwei Schichten aus Keramik aus ferroelektrischer Grünkeramik bestehen.
75. Verfahren nach einem der Ansprüche 71 bis 74, dadurch gekennzeichnet, daß das Verwinden und Übereinanderstapeln der Teilsegmente durch Aufbringen 35 der Teilsegmente auf eine Unterlage erfolgt, die die Steigung einer Helixwindung vorgibt.
76. Verfahren nach Anspruch 75, dadurch gekennzeichnet, daß die Unterlage aus einem Keramikgrünkörper besteht. 40
77. Verfahren nach einem der Ansprüche 75 oder 76, dadurch gekennzeichnet, daß ein abgerundeter Verlauf der Elektroden-Anfangs- beziehungsweise Endstücke gemäß Anspruch 9 mit Hilfe von aus der Folie ausgestanzten streifenförmigen Teilen realisiert wird. 45

Hierzu 22 Seite(n) Zeichnungen

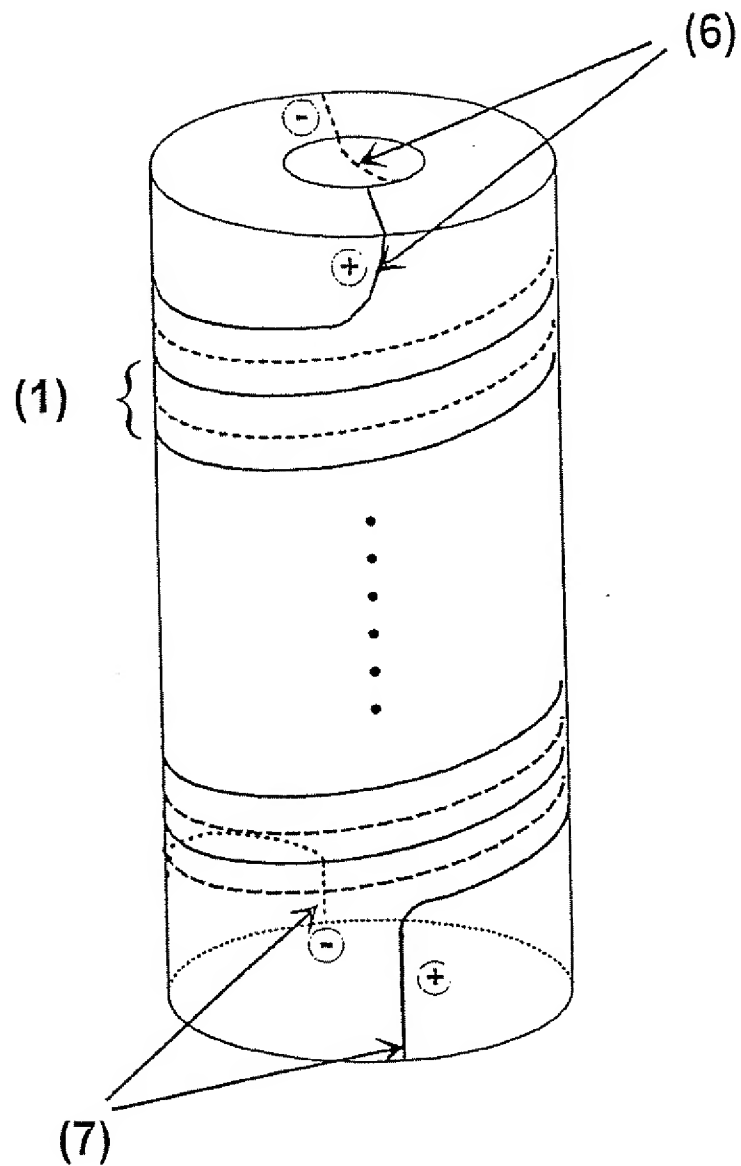
50

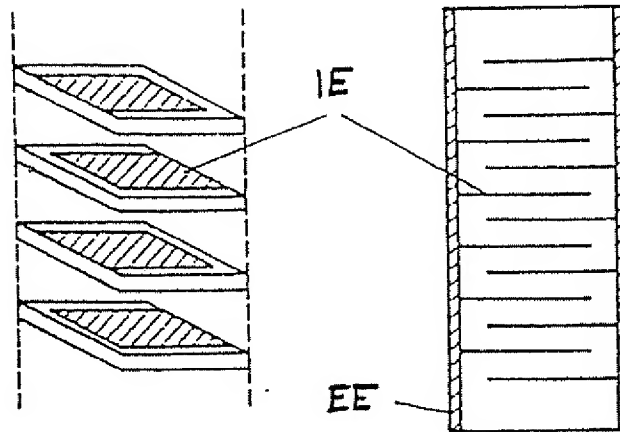
55

60

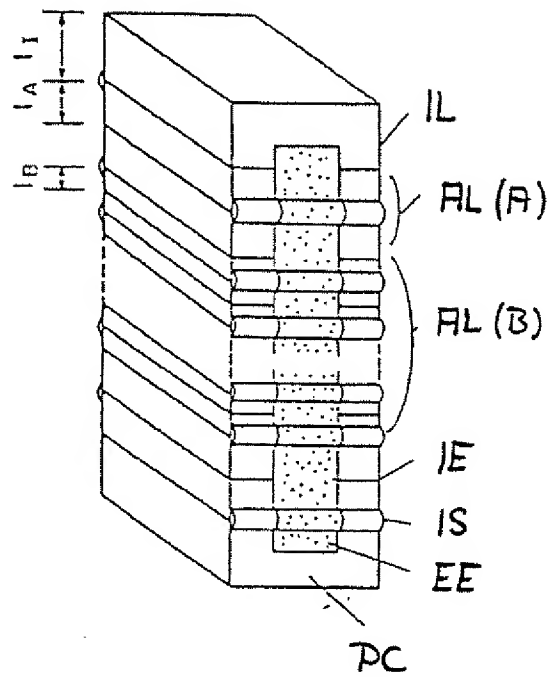
65

Figur 1

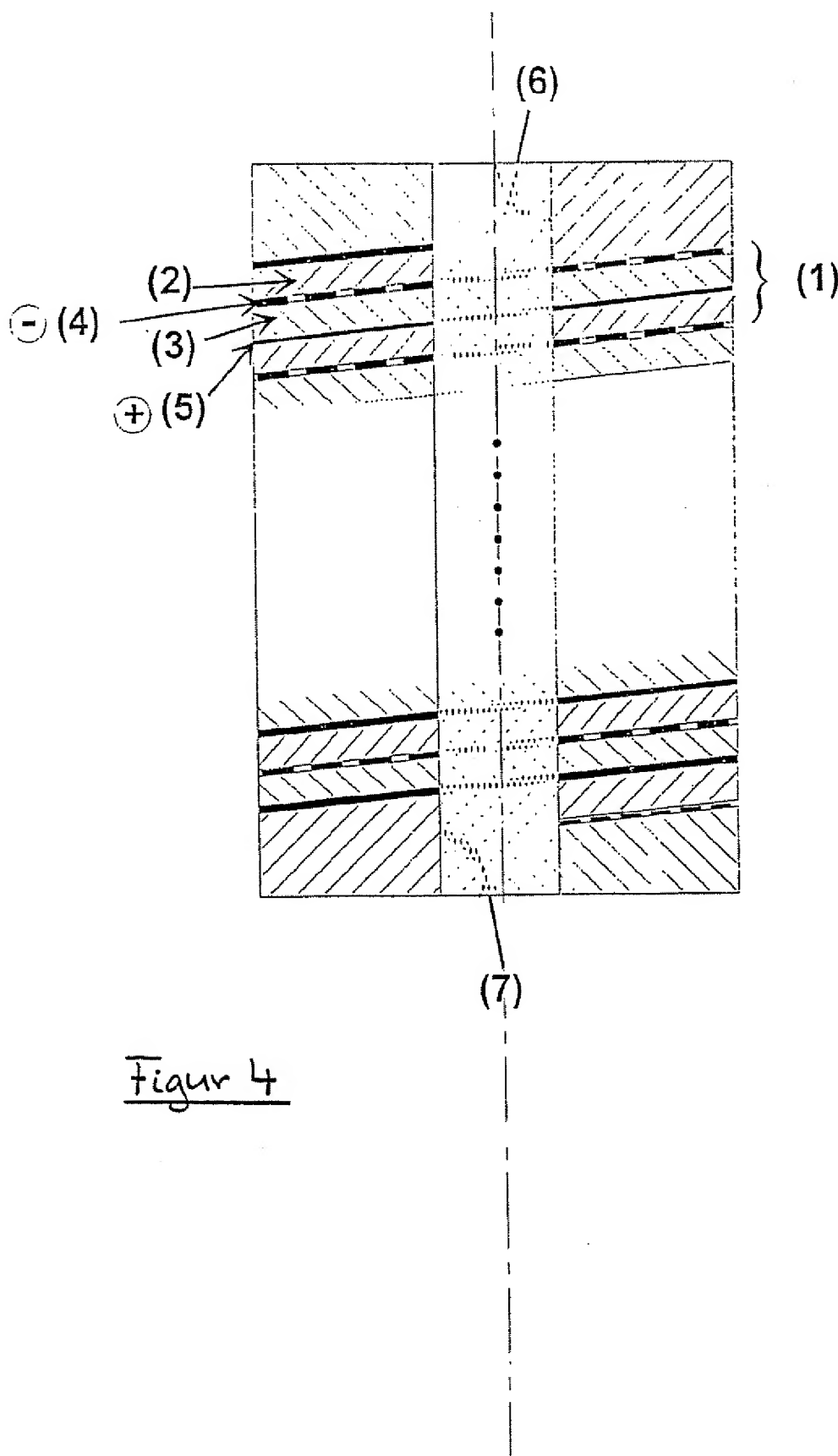




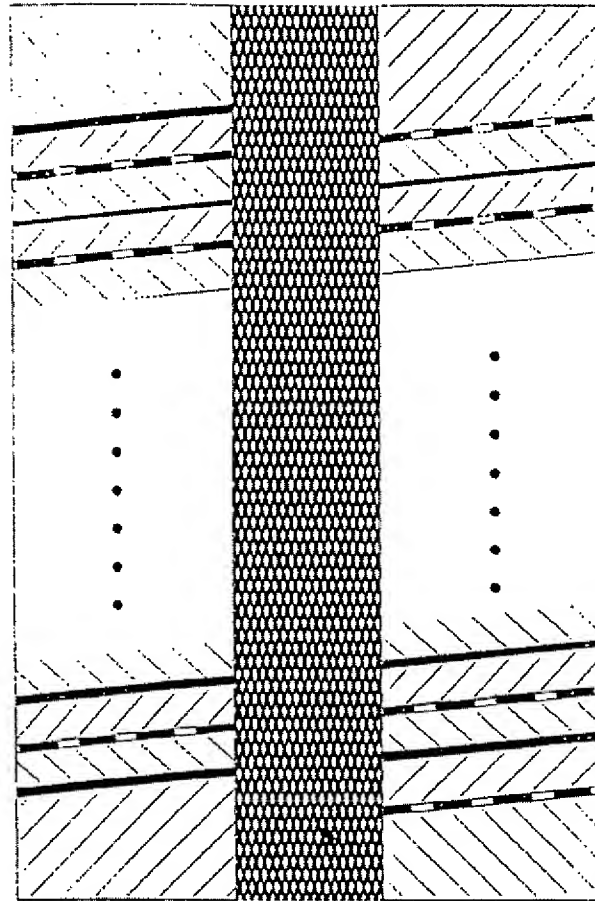
Figur 2



Figur 3

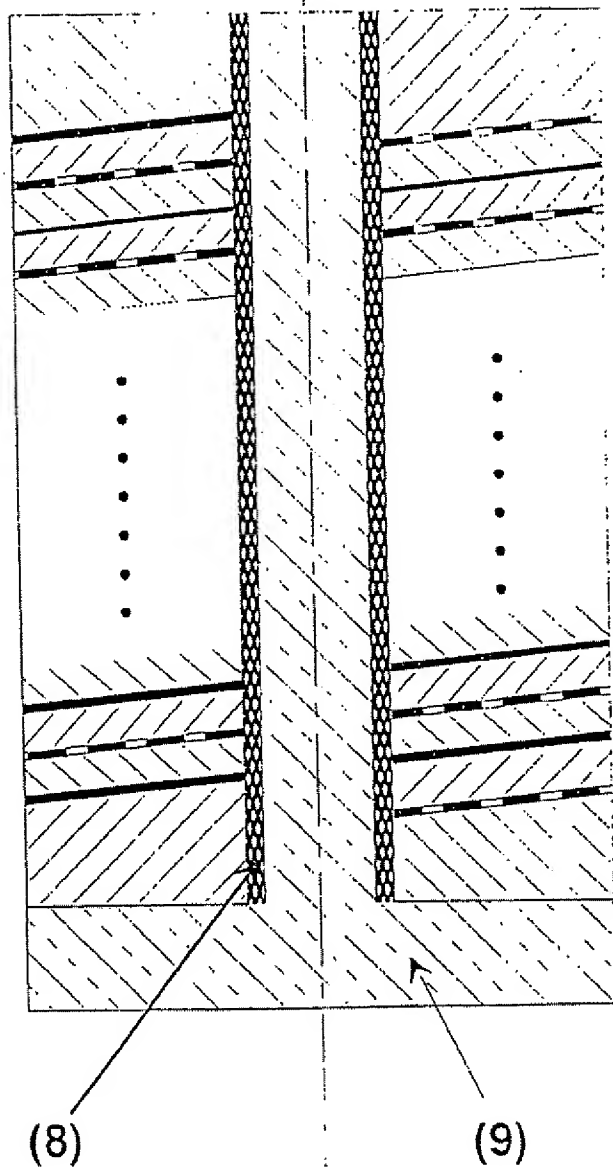


Figur 4

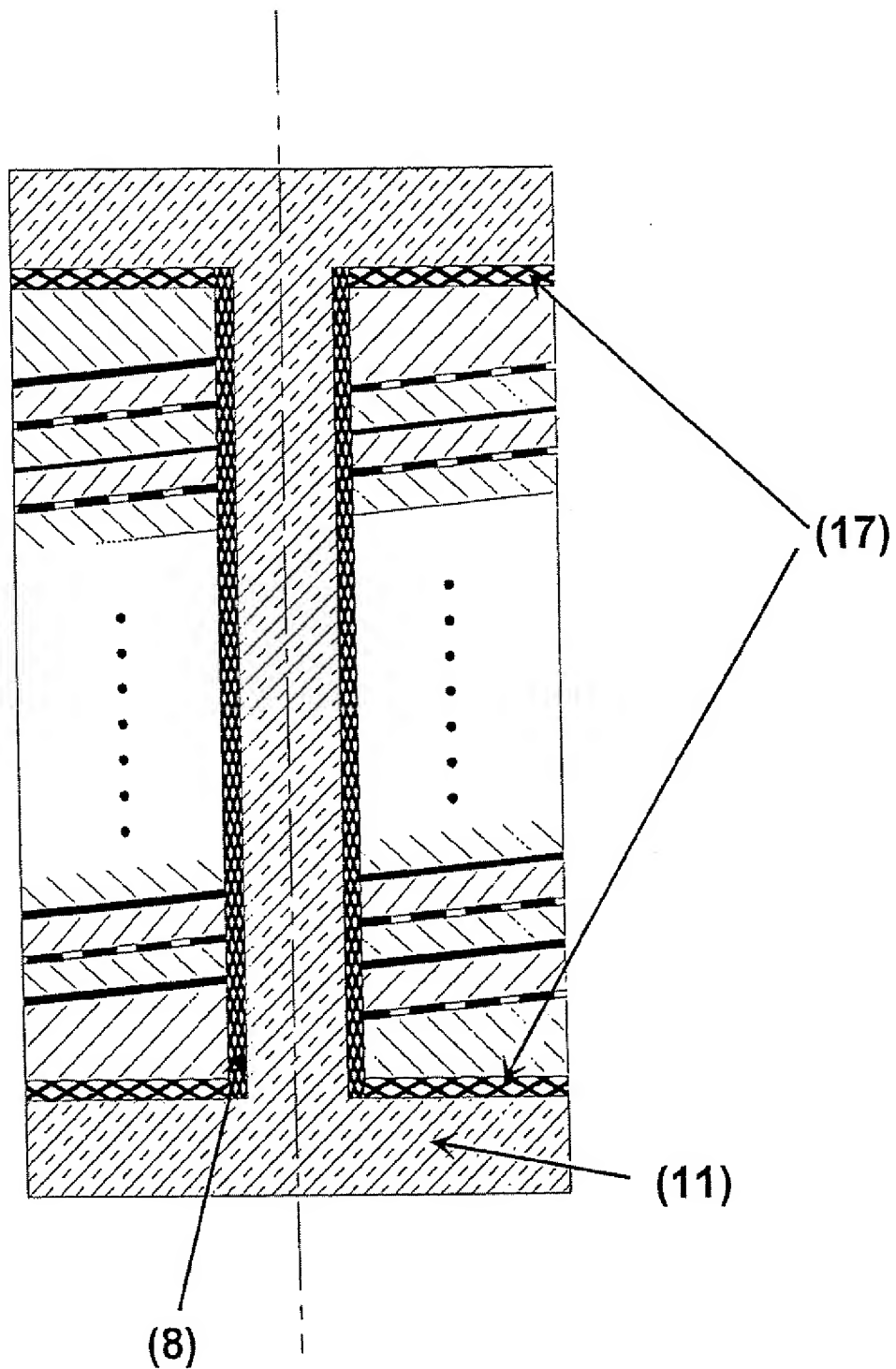


(8)

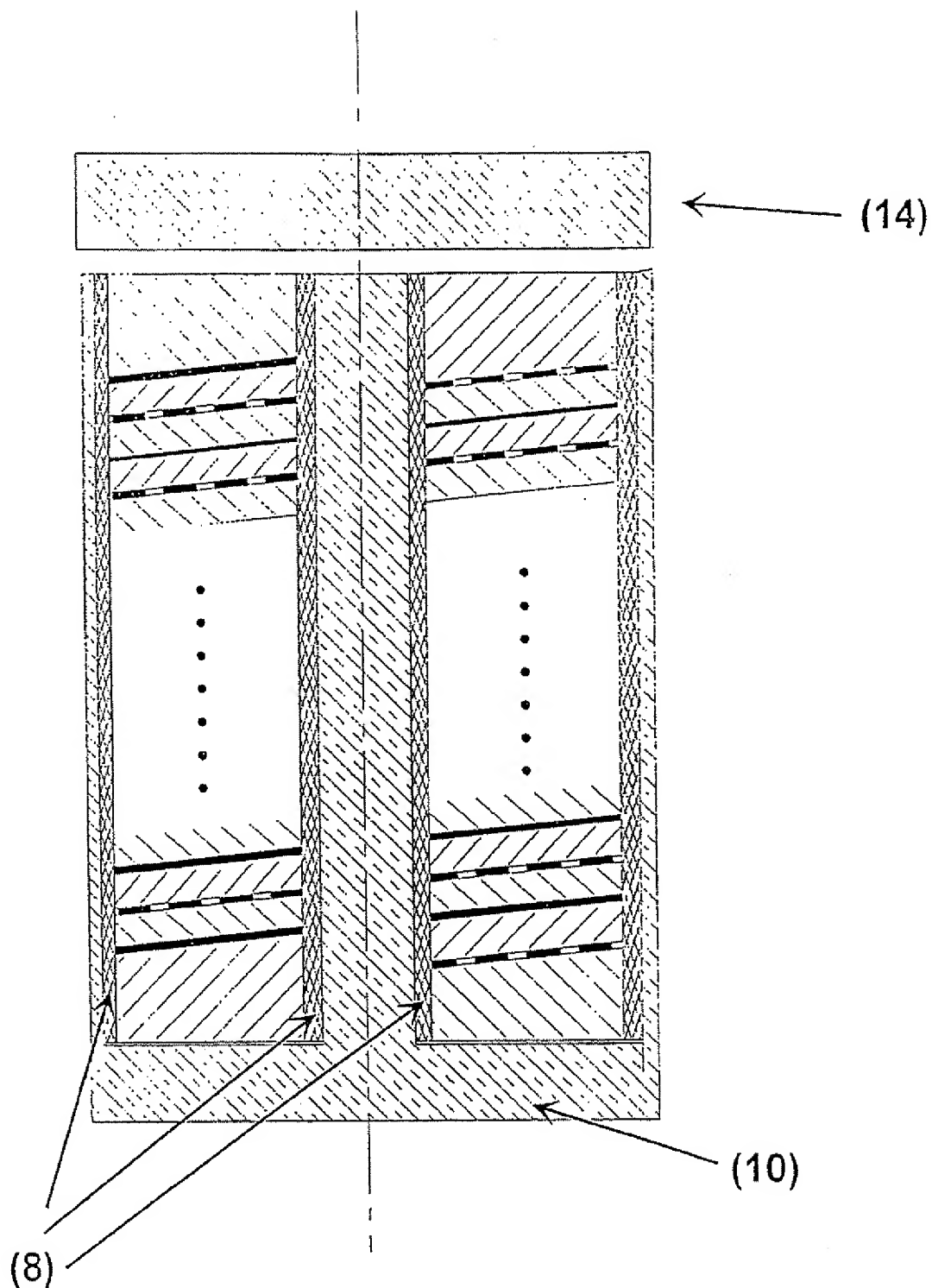
Figur 5



Figur 6

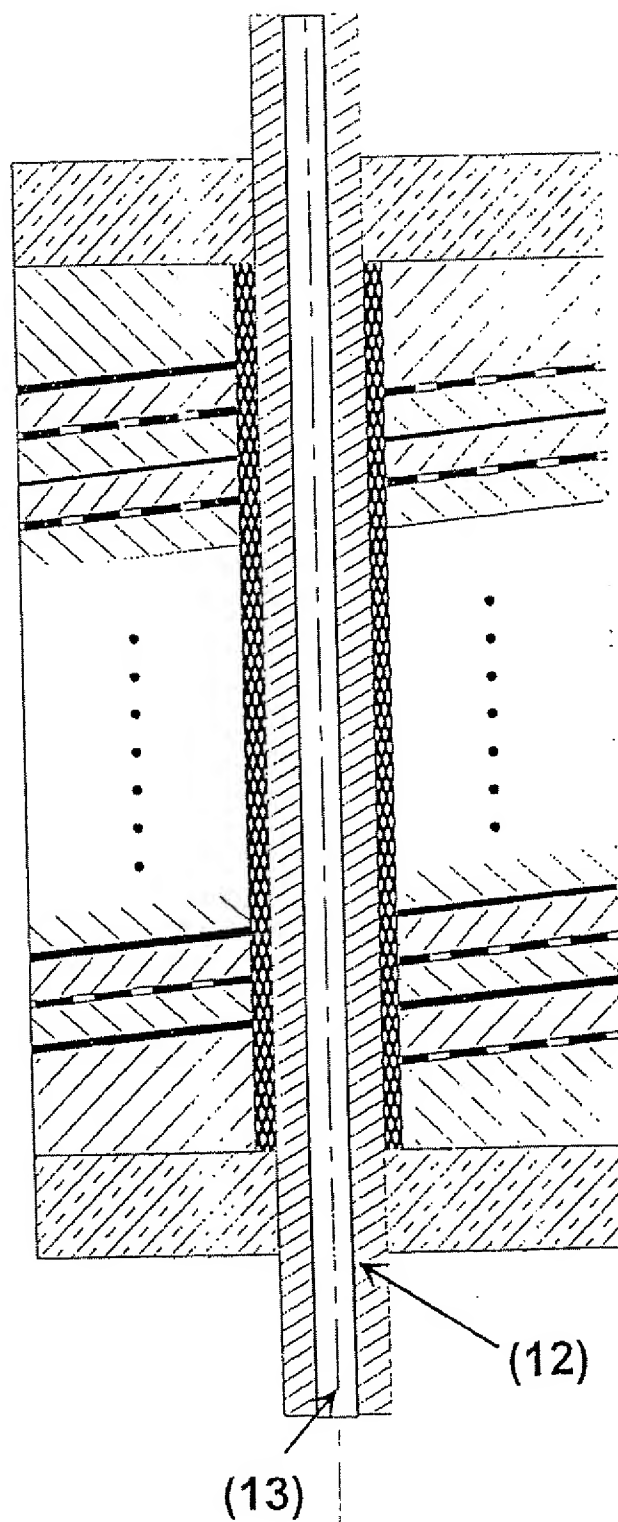


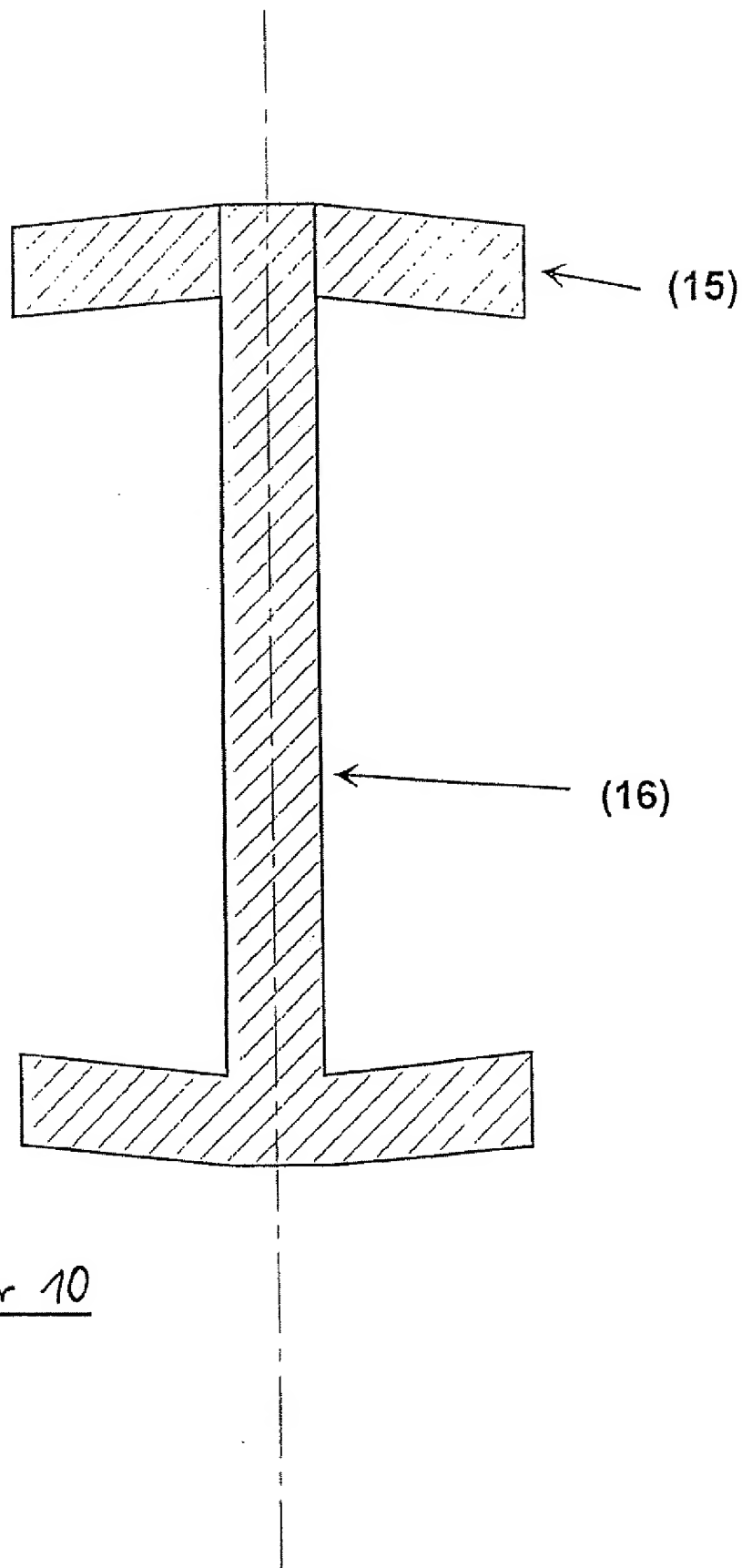
Figur 7



Figur 8

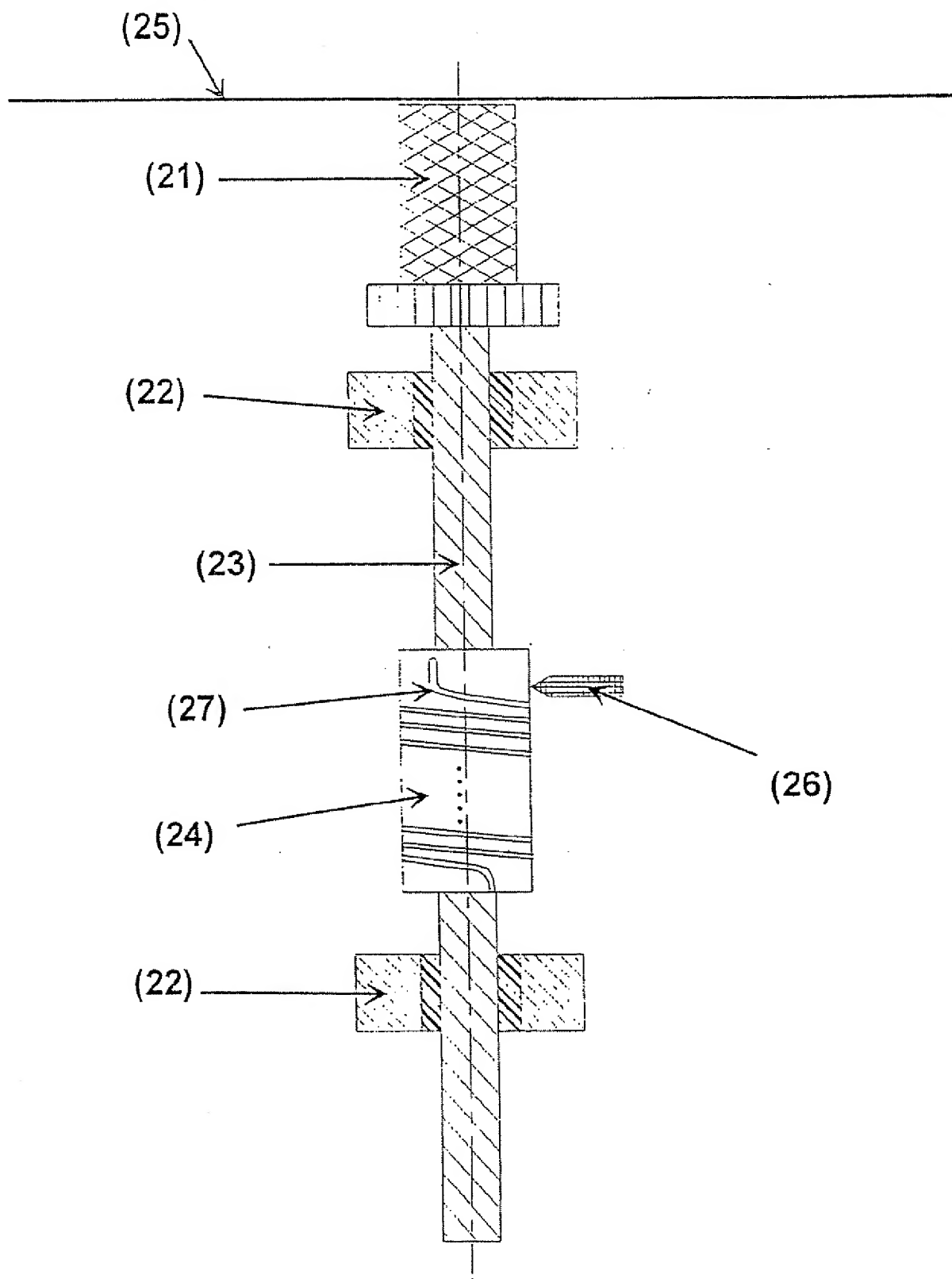
Figur 9

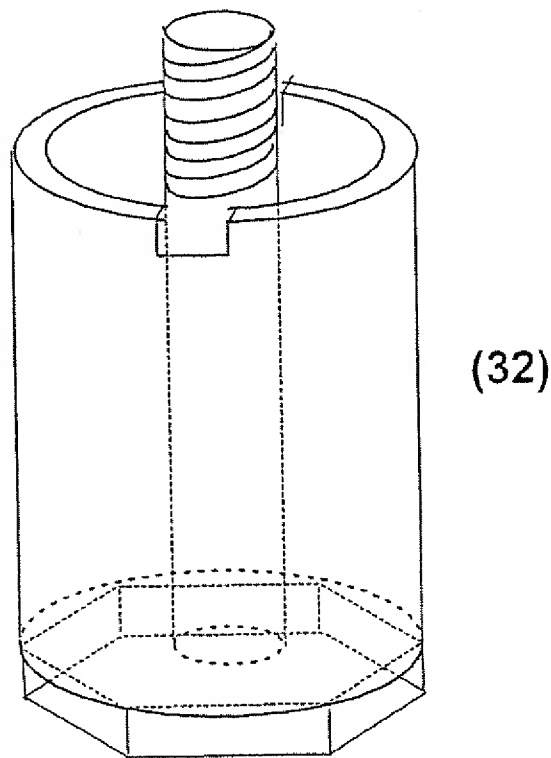
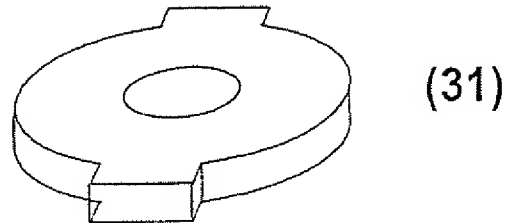
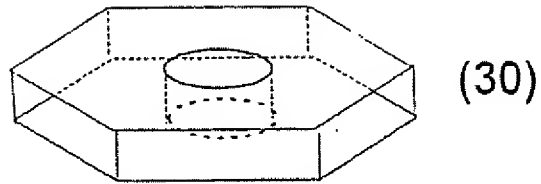




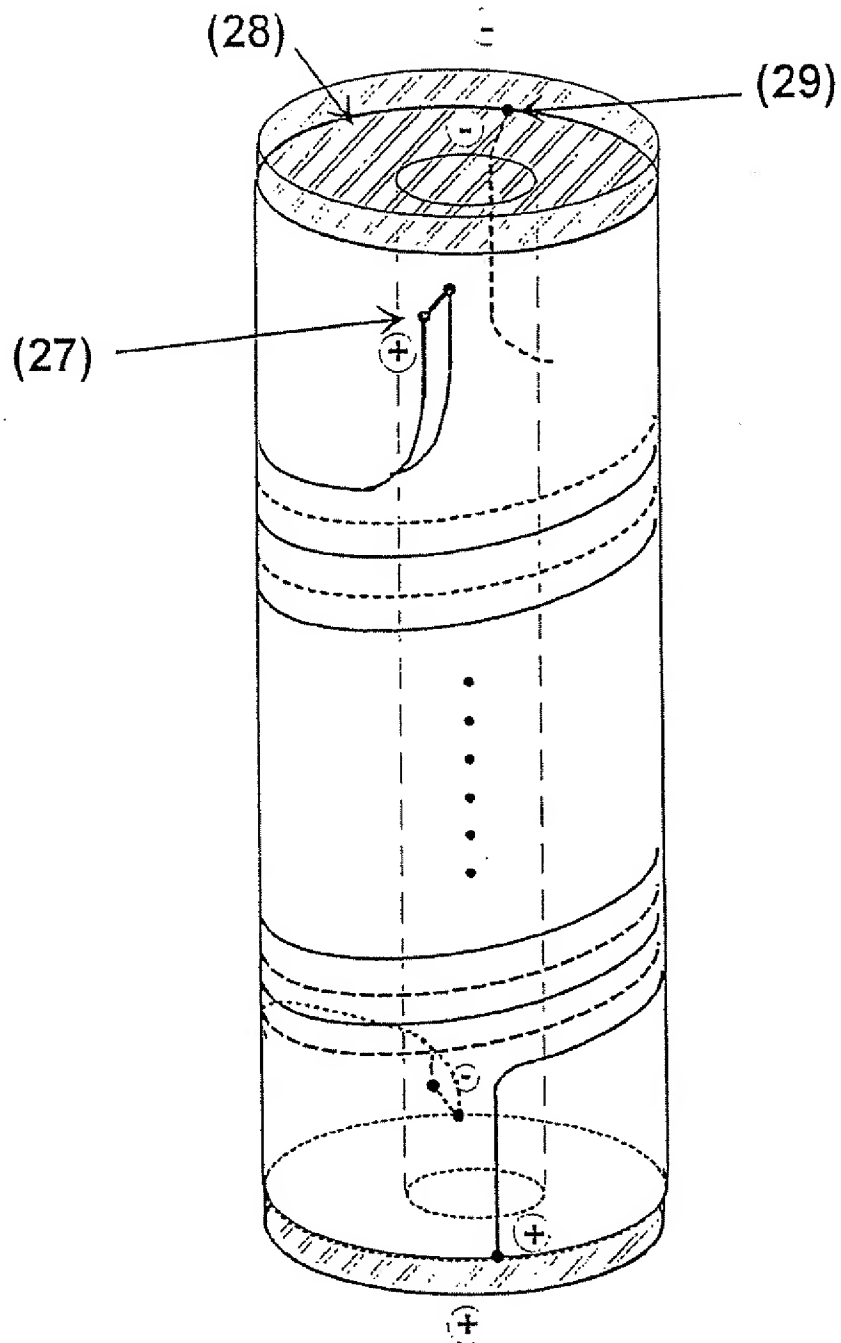
Figur 10

Figur 11

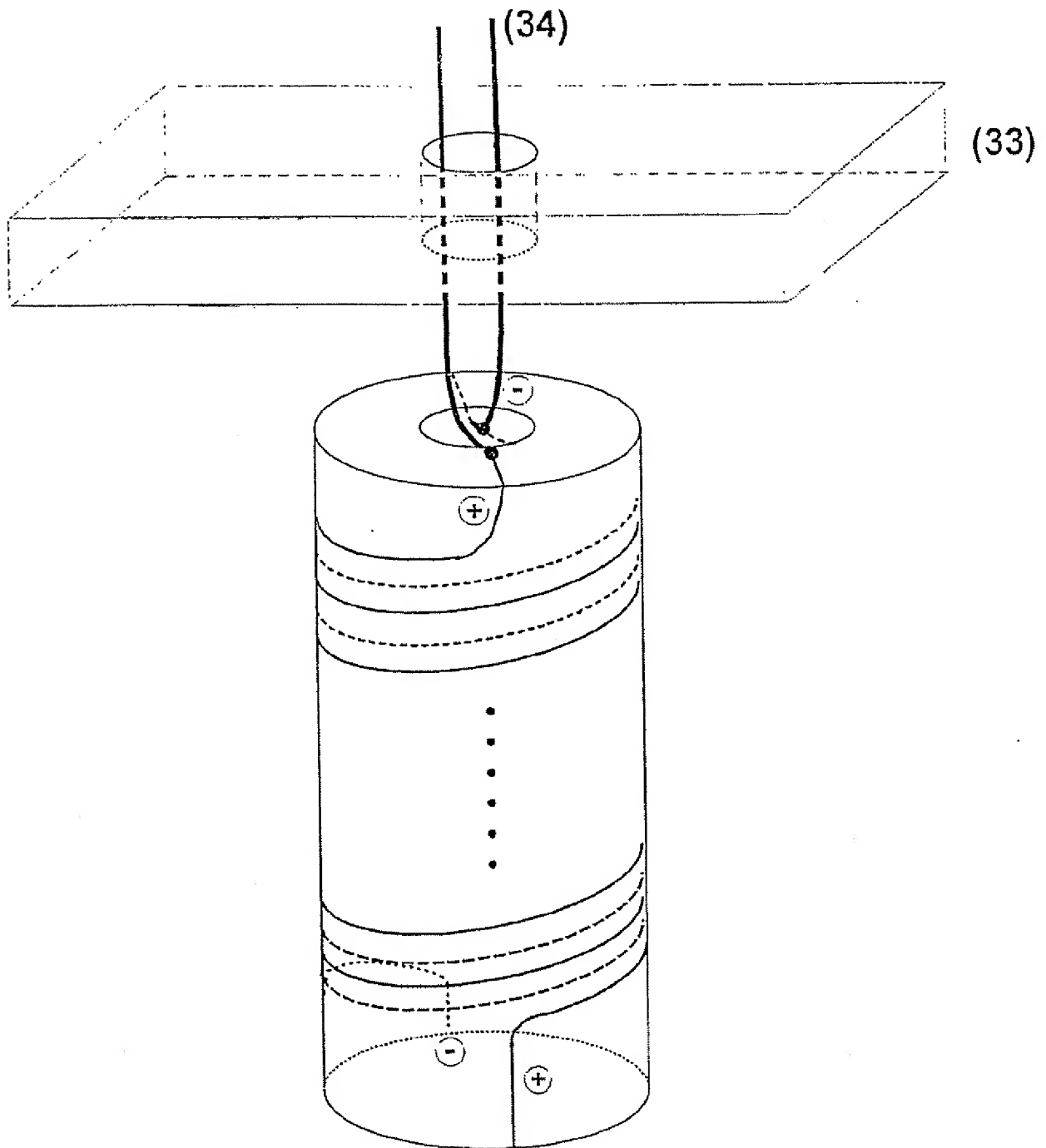




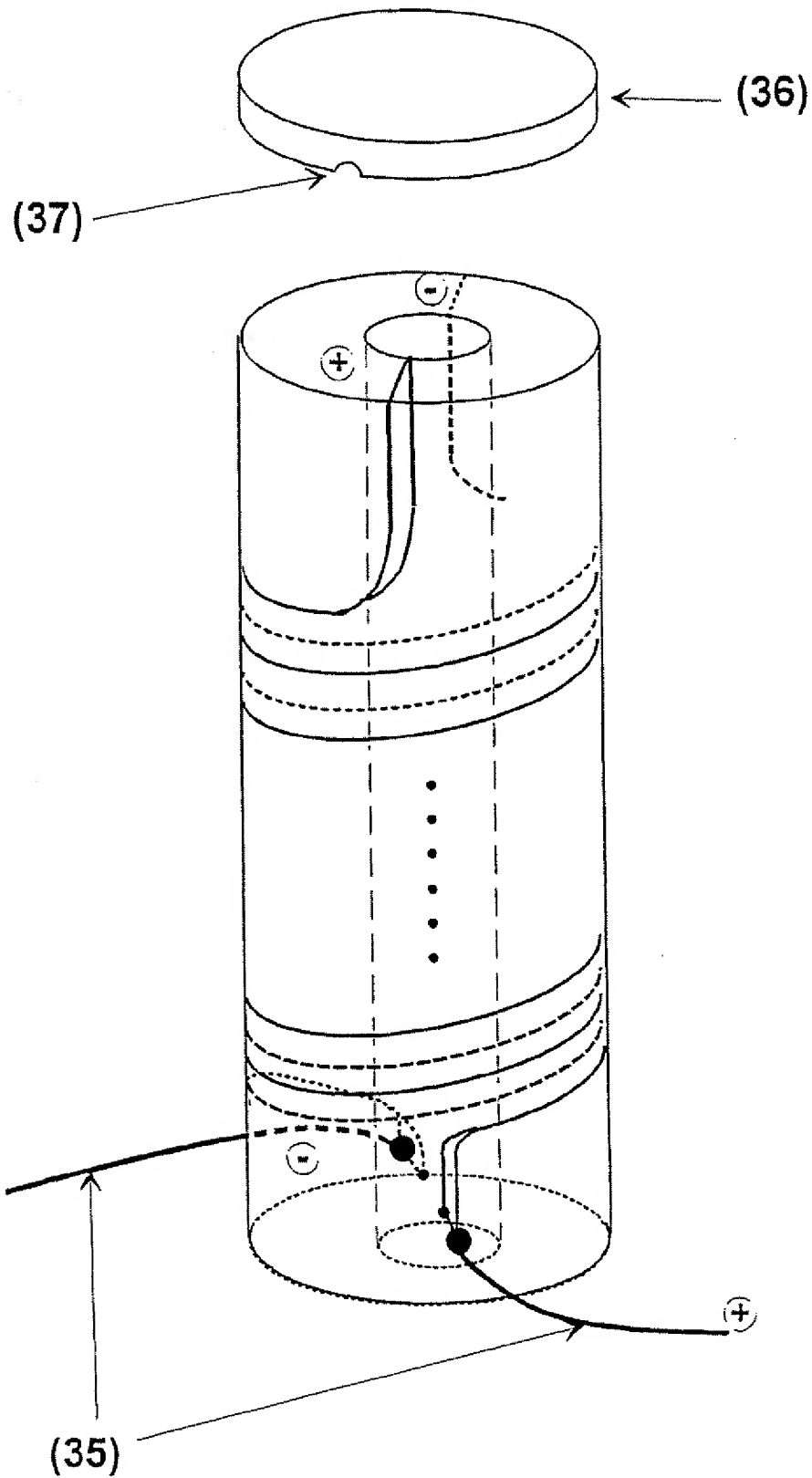
Figur 12



Figur 13

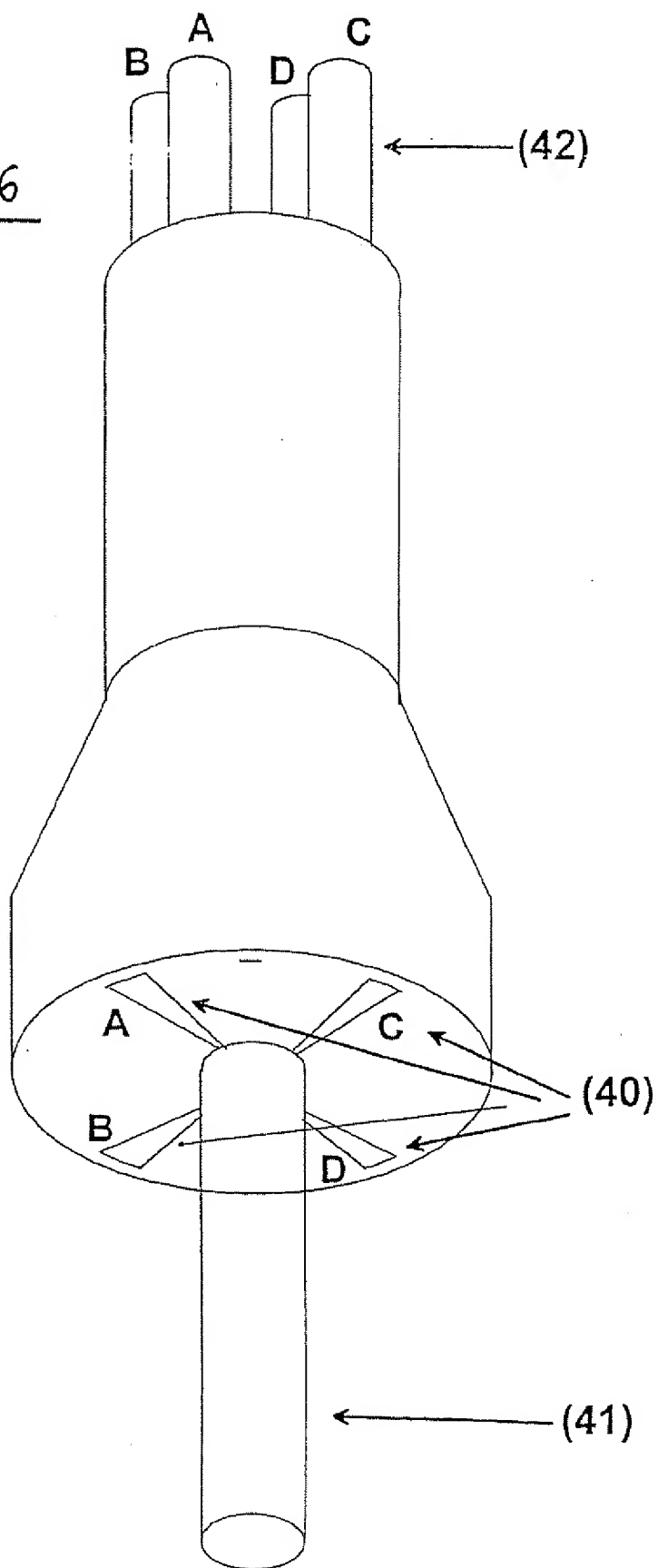


Figur 14

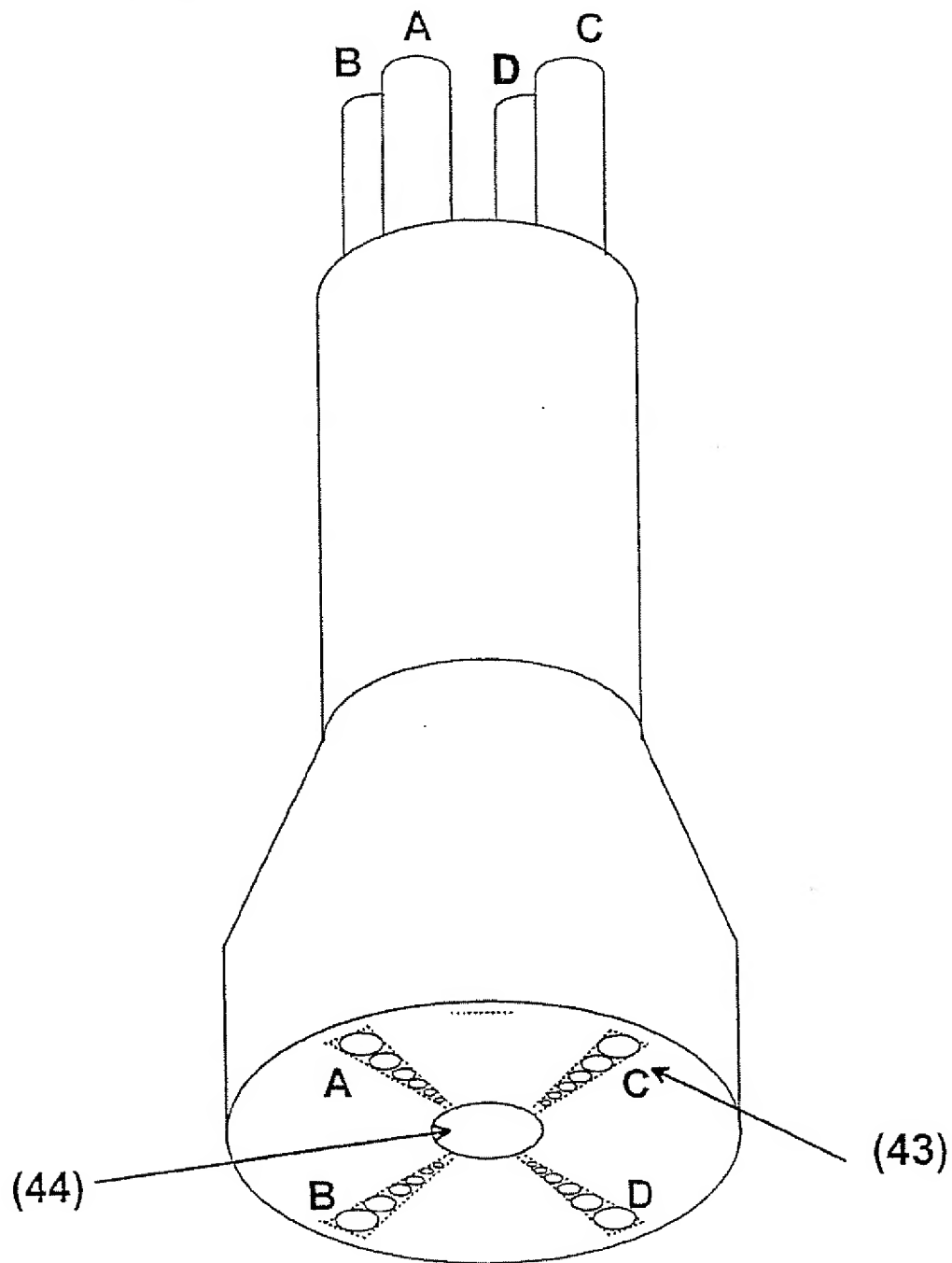


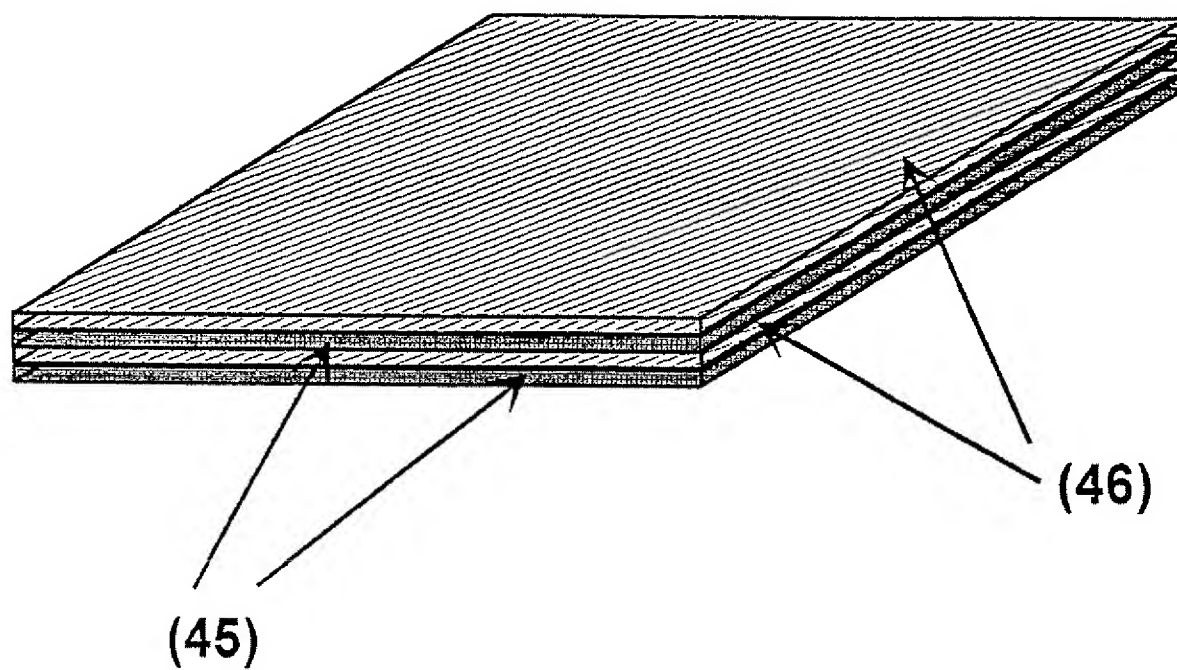
Figur 15

Figur 16



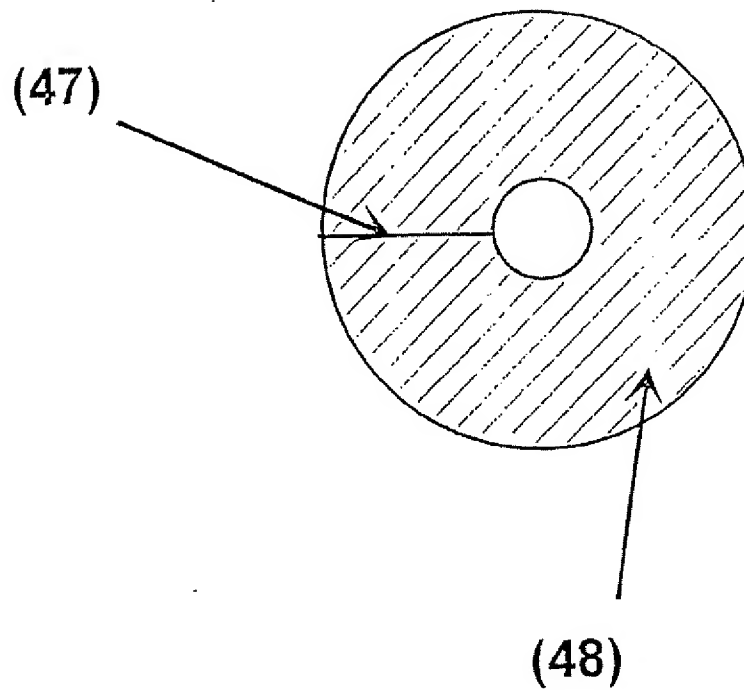
Figur 17



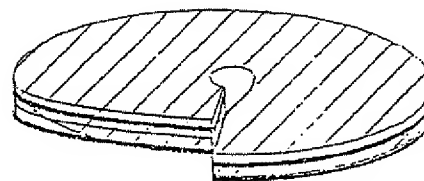


Figur. 18

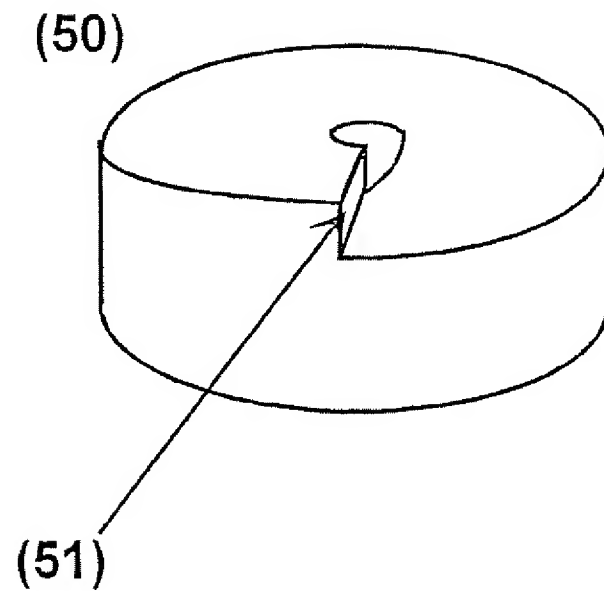
Figur 19



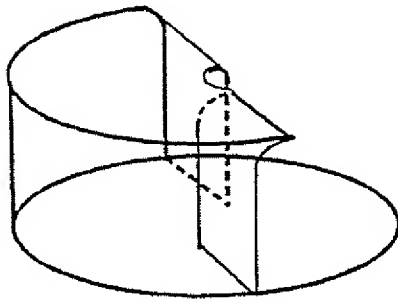
(49)



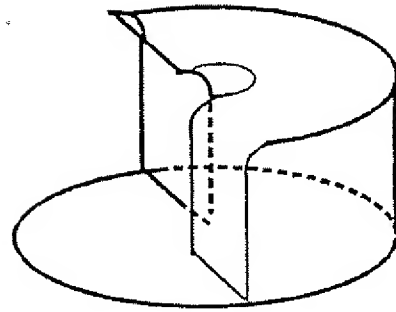
Figur 20



(52)



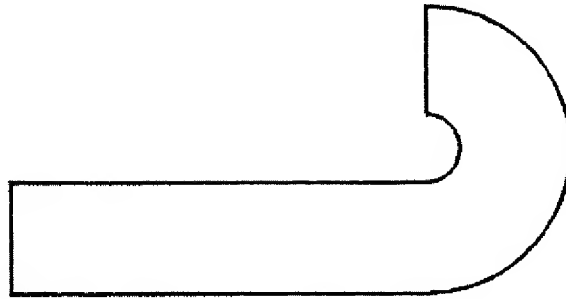
(53)



Figur 21

Figur 22

(54)



(55)

